

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo

Universidade de São Paulo

# **Soluções Projetuais de Fachadas para Edifícios de Escritórios com Ventilação Natural em São Paulo**

**Mônica Pereira Marcondes**

São Paulo, 2010



**Mônica Pereira Marcondes**

**Soluções Projetuais de Fachadas para Edifícios de Escritórios com  
Ventilação Natural em São Paulo**

Tese apresentada junto à Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Arquitetura e Urbanismo. Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura.

Orientadora: Prof. Dra. Marcia Peinado Alucci

São Paulo, 2010

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

E-MAIL: marcondesmo@usp.br

M744s Marcondes, Mônica Pereira  
Soluções projetuais de fachadas para edifícios de escritórios com ventilação natural em São Paulo – São Paulo, 2010.  
244 p. : il.

Tese (Doutorado - Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura) - FAUUSP.

Orientadora: Márcia Peinado Alucci

1. Edifícios de escritórios – São Paulo 2. Conforto térmico  
3. Ventilação 4. Fachadas I. Título

CDU 043:725.23

## Dedicatória

Aos meus pais e meu irmão, que me apoiaram, me incentivaram,  
participaram e vibraram em cada etapa e em cada conquista da  
minha vida profissional.

E ao meu amor, que acompanhou todo o processo de  
desenvolvimento deste trabalho, com muito apoio, suporte e torcida.



## Agradecimentos

À Profa. Dra. Marcia Peinado Alucci, pelo carinho, orientação e ensinamentos para o desenvolvimento da pesquisa, fundamentais, e para a vida, meus sinceros agradecimentos.

À Profa. Dra. Joana Carla Soares Gonçalves, minha “co-orientadora”, mestre e amiga de longa data, obrigada pela presença, amizade, apoio, incentivo e ensinamentos durante a pesquisa.

Aos professores do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética do Departamento de Tecnologia da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (LABAUT/FAUUSP): Profa. Dra. Anésia Barros Frota, pelos ensinamentos sobre ventilação natural; Profa. Dra. Denise Duarte, pela atenção e colaboração durante o processo; Prof. Dra. Roberta Kronka, Prof. Fernando Cremonesi e Prof. Antonio Gil Andrade, pela simpatia e atenção.

Ao Prof. Dr. Fulvio Vittorino, do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), e ao Prof. Dr. Simos Yannas da Architectural Association Graduate School (AA) em Londres, pelas indicações de possíveis abordagens para a pesquisa.

A Klaus Bode, do escritório de engenharia e consultoria BDSP Partnership, em Londres, pela disponibilização de imagens e informações técnicas sobre edifícios de escritórios no contexto internacional.

Ao arquiteto Robert Harisson do escritório internacional Foster & Partners pela permissão e pelo acompanhamento durante a visita técnica ao Edifício St. Marys Axe, na cidade de Londres.

A Peter Muschelknautz, gerente de facilidades do Edifício Commerzbank, pelas informações fornecidas durante a visita técnica ao edifício, na cidade de Frankfurt Am Main.

Ao arquiteto Ruy Rezende e à equipe da RRA Arquitetura pelo fornecimento de informações técnicas e por viabilizar a visita técnica ao Edifício Cidade Nova, na cidade do Rio de Janeiro.

À arquiteta Clarissa Bolivar, da Gafisa, pelas informações e acompanhamento durante visita técnica ao Edifício Eldorado Business Tower, na cidade de São Paulo.

Ao engenheiro Fernando Marques, do LNEC, em Portugal, pelas informações fornecidas no início da pesquisa.

Ao engenheiro Dr. Fernando Westphal pelas discussões e sugestões durante o Exame de Qualificação, e pelas informações disponibilizadas sobre edifícios de escritórios na cidade de São Paulo.

Ao Prof. Dr. Roberto Lamberts, do Laboratório de Eficiência Energética da Universidade Federal de Santa Catarina (Labeee-UFSC), pelas informações e interesse pela pesquisa nas ocasiões das conferências internacionais Building Simulation - BS 2007, na cidade de Pequim, e Cidades Sustentáveis, na FAUUSP, em 2007.

Ao ex-estagiário do LABAUT, Carlos Bayer, pelo suporte técnico e auxílio com equipamentos, durante sua estada no laboratório.

À Eliane, Silvana e Viviane do Departamento de Tecnologia da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, pela atenção e presteza no suprimento de infra-estrutura e recursos.

Aos profissionais da equipe de suporte técnico da FAUUSP, Cláudio e Fernando, pela prestação no atendimento para configuração de rede e solução de problemas com os computadores do LABAUT.

À Associação Nacional para Simulação de Desempenho de Edificações (IBPSA-Brasil) pelo auxílio para participação na conferência internacional Building Simulation (BS2007), em Pequim.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro no início da pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo apoio financeiro ao longo da pesquisa.

Agradecimentos especiais à Anita Tan de Domenico, pelo incentivo e companheirismo no fechamento da pesquisa, e pelo perfeccionismo na execução dos desenhos técnicos; à Cecília Muller, pelo carinho e prestação na elaboração do projeto gráfico da capa; à Erica Umakoshi, pelo apoio, atenção e disposição na formatação da tese; e a Leonardo Marques Monteiro, pela atenção, disponibilidade e prestação na realização da primeira revisão da tese, e pelas discussões em etapas cruciais da pesquisa. Meus profundos agradecimentos. A participação de vocês foi essencial para a finalização e a concretização deste trabalho!

A todos os colegas do LABAUT/FAUUSP, agradeço pelo convívio tão enriquecedor e agradável, pelo constante aprendizado e ensinamento, por todo o apoio e incentivo que recebi para o desenvolvimento desta pesquisa e principalmente pela oportunidade de encontrar grandes amigos. Dentre esses, não posso deixar de mencionar: Alessandra Prata, Andrea Vosgueritchian, Anna Christina Mianna, Anarrita Buoro, Bruna Luz, Carolina Leite, Cecília Muller, Daniel Cóstola, Daniela Laudares, Erica Umakoshi, Gisele de Benedetto, Leonardo Monteiro, Luciana Correa, Norberto Moura, Paula Shinzato e Rafael Brandão.

Aos meus grandes amigos e amigas campineiros, obrigada pelo carinho e apoio durante esse período.

À minha tão querida família e ao meu amor, pelo apoio incondicional, paciência em momentos difíceis dessa trajetória, ajuda, incentivo e motivação, sempre. Sem vocês nada disso seria possível! Obrigada por serem pessoas tão especiais, e por tornarem minha vida tão especial!

Por fim, a todos que tiveram alguma participação na realização deste trabalho e àqueles que acreditaram em sua concretização, meus mais sinceros agradecimentos.

Mônica Pereira Marcondes

## Sumário

Lista de Figuras.....	IX
Lista de Tabelas.....	XVII
Lista de Reduções.....	XIX
Resumo.....	XXIII
Abstract.....	XXV
<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>CAPÍTULO 1. A GERAÇÃO DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS DA DÉCADA DE 1990 AO INÍCIO DOS ANOS 2000.....</b>	<b>9</b>
1.1. Conforto térmico e condições climáticas.....	13
1.1.1. O Conforto Térmico.....	13
1.1.2. Condições Climáticas.....	16
1.2. Panorama Internacional.....	36
1.2.1. Edifícios de escritórios no contexto internacional a partir do final da década de 1990.....	37
1.3. Contexto Local.....	61
1.3.1. Precedentes e evolução da tipologia no Brasil.....	61
1.3.2. Edifícios de escritórios brasileiros a partir de 2005.....	64
1.3.3. Iniciativa rumo a uma legislação energética para os edifícios brasileiros.....	75
1.4. Considerações Finais.....	76
<b>CAPÍTULO 2. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE FACHADAS E DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS.....</b>	<b>85</b>
2.1. Índices de Conforto.....	87
2.2. Critérios e indicadores de Desempenho Térmico e Energético.....	88
2.2.1. Normatização.....	88
2.2.2. Critérios e Indicadores de Desempenho Térmico e Energético propostos a partir de 2000.....	93
2.3. Ferramentas de Avaliação.....	93
2.4. Métodos Existentes.....	97

2.5. Considerações Finais.....	100
--------------------------------	-----

### **CAPÍTULO 3. EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS: MODELOS DE REFERÊNCIA.....103**

3.1. Exemplos e justificativas.....	105
3.2. Caracterização arquitetônica dos modelos de edifício e estratégias de conforto térmico.....	106
3.3. Parâmetros de ocupação.....	113
3.4. Considerações Finais.....	114

### **CAPÍTULO 4. CARACTERIZAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS COM VENTILAÇÃO NATURAL: SUBSÍDIOS PARA O PROJETO DE SOLUÇÕES DE FACHADAS.....117**

4.1. Método de Avaliação.....	119
4.1.1. Critério de avaliação.....	120
4.1.2. Banco de Dados Climáticos da cidade de São Paulo.....	121
4.1.3. Cenários de análise.....	127
4.2. Cálculo de Ventilação Natural: definição de vazão de ar de referência.....	128
4.2.1. Definição de situação de referência para cálculo da vazão de ar.....	128
4.2.2. Cálculo da vazão de ar de referência.....	130
4.3. Simulações de Desempenho Térmico.....	141
4.3.1. Modelos Geométricos.....	141
4.3.2. Parâmetros e Cenários de simulação.....	143
4.3.3. Verificação da premissa de ventilação natural para a simulação computacional.....	144
4.3.4. Resultados.....	144
4.4. Considerações Finais.....	149

### **CAPÍTULO 5. SOLUÇÕES PROJETUAIS DE FACHADAS PARA EDIFÍCIOS DE ESCRITÓRIOS COM VENTILAÇÃO NATURAL.....153**

5.1. Procedimento para o dimensionamento de soluções de fachadas.....	156
5.1.1. Definição dos componentes opaco e transparente (ou translúcido), e a proporção entre eles (wwr).....	156
5.1.2. Definição do tipo de abertura da fachada; dimensionamento e posicionamento.....	166
5.2. Soluções de fachadas.....	174

5.3. Considerações Finais.....	186
<b>CAPÍTULO 6. CONCLUSÕES, CONSIDERAÇÕES FINAIS E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS.....</b>	<b>189</b>
6.1. Conclusões.....	191
6.1.1. Síntese conclusiva dos resultados da avaliação de desempenho térmico realizada para os modelos de referência de edifícios de escritórios com ventilação natural, sob as condições climáticas de São Paulo.....	191
6.1.2. Validação da hipótese e satisfação dos objetivos do trabalho.....	193
6.1.3. Produtos da pesquisa.....	193
6.2. Considerações Finais.....	194
6.3. Desenvolvimentos Futuros.....	199
<b>CAPÍTULO 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>203</b>
<b>APÊNDICES.....</b>	<b>223</b>
A - Resultado detalhado do cálculo da vazão de ar por efeito chaminé, segundo método proposto em Frota & Schiffer (1995), para os cenários de análise da pesquisa.....	225
B - Cálculo da vazão de ar por efeito chaminé segundo método proposto pela norma inglesa BS 5925 (1991) para os cenários de análise da pesquisa.....	226
C - Resultado detalhado da avaliação de desempenho térmico dos cenários de edifícios com simulação computacional.....	227
D - Gráficos da correlação “wwr x FS” para os vinte e três cenários de edifícios de estudo, válida para fachadas com “U x $\alpha$ = 1”.....	228



## Lista de Figuras

Figura 1. Previsão de consumo energético mundial até 2030 (Fonte: International Energy Outlook 2009, DOE/IEA 2009) .....	1
Figura 2. Consumo energético total mundial em 2007, por região, em Mtoe (Fonte: IEA, 2009) .....	3
Figura 3. Evolução do consumo de energia hidráulica e eletricidade no Brasil: Setor Comercial e Público (Fonte: BEN 2009, MME 2009) .....	3
Figura 4. Etapas de desenvolvimento desta pesquisa .....	7
Figura 5. Faixas de temperatura operativa aceitáveis para ambientes naturalmente condicionados de acordo com a temperatura média mensal e a porcentagem de ocupantes insatisfeitos, proposta pela norma ASHRAE 55 (2004) 16	
Figura 6. Carta psicrométrica com dados de temperatura e umidade relativa do ar da cidade de São Paulo (Fonte: Climáticos; Alluci 2005, apud Givoni) .....	17
Figura 7. Diagnóstico climático da cidade de Nova York (US) .....	18
Figura 8. Diagnóstico climático da cidade de Frankfurt Am Main (ALE) .....	19
Figura 9. Diagnóstico climático da cidade de Berlin (ALE).....	20
Figura 10. Diagnóstico climático da cidade de Bonn (ALE) .....	21
Figura 11. Diagnóstico climático da cidade de Londres (ING) .....	22
Figura 12. Diagnóstico climático da cidade de Sydney (AUS) .....	23
Figura 13. Diagnóstico climático da cidade de Melbourne (AUS) .....	24
Figura 14. Diagnóstico climático da cidade de Tokyo (JAP) .....	25
Figura 15. Diagnóstico climático da cidade de Rio de Janeiro (BR) .....	26
Figura 16. Diagnóstico climático da cidade de São Paulo (BR) .....	27
Figuras 17 e 18. Rosa dos ventos para as cidades de Nova York, Frankfurt: frequência de ocorrência de direção e velocidade do vento ao longo do ano.....	31
Figuras 19 e 20. Rosa dos ventos para as cidades de Berlin e Bonn: frequência de ocorrência de direção e velocidade do vento ao longo do ano.....	32
Figuras 21 e 22. Rosa dos ventos para as cidades de Londres e Melbourne: frequência de ocorrência de direção e velocidade do vento ao longo do ano.....	32
Figuras 23 e 24. Rosa dos ventos para as cidades Sydney e Tokyo: frequência de ocorrência de direção e velocidade do vento ao longo do ano.....	32
Figuras 25 e 26. Rosa dos ventos para as cidades Rio de Janeiro e São Paulo: frequência de ocorrência de direção e velocidade do vento ao longo do ano.....	33
Figura 27. Frequência de ocorrência de iluminância no plano horizontal em São Paulo; destaque para 80% do tempo.....	35
Figura 30. New York Times Building: modelo do edifício inserido na quadra (Fonte: Wells, 2005) .....	39
Figuras 28 e 29. Edifício 4 Times Square, em Nova York (1999): vista das fachadas de vidro contendo painéis	

fotovoltaicos, à esquerda; e vista do edifício em seu local de implantação, à direita (Fonte: Wells, 2005).....	39
Figuras 33 e 34. Hearst Tower: vista externa do edifício. Disponível em: < <a href="http://www.hearst.com.tower">http://www.hearst.com.tower</a> >. Acesso em: 03 julho de 2007. ....	39
Figura 31. New York Times Building: mock-up de ensaio para avaliação do desempenho luminoso da fachada com brises cerâmicos (Créditos: Vorapat Inkarojrit) .....	39
Figura 32. New York Times Building: planta de um pavimento tipo (Fonte: LBNL, 2009) .....	39
Figura 35. Edifício Commerzbank: vista de um escritório voltado para o átrio .....	43
Figura 40. Edifício Commerzbank, em Frankfurt: jardim de uma vila de escritórios .....	43
Figura 38. Edifício Commerzbank: planta do pavimento tipo (Créditos: Klaus Bode).....	43
Figura 36 e 37. Edifício Commerzbank, em Frankfurt: átrio interno .....	43
Figuras 41 e 42. Edifício Commerzbank: detalhe da fachada de um escritório periférico, com elementos de proteção solar e esquadrias móveis para ventilação natural .....	43
Figura 39. Edifício Commerzbank, em Frankfurt: vista exterior (Fonte: Wells, 2005).....	43
Figura 43. Edifício Debis, em Berlin: vista do edifício, com o bloco alto ao fundo (Fonte: Wells, 2005).....	45
Figura 46. Edifício Debis: detalhe do brise cerâmico na fachada externa .....	45
Figura 49. Edifício Debis, em Berlin: interior de uma sala de escritórios (Fonte: LBNL, 2002) .....	45
Figura 44. Edifício Debis, em Berlin: vista da fachada dupla ventilada, à esquerda, e da fachada com brises cerâmicos, à direita .....	45
Figura 47. Edifício Debis: croqui esquemático das fachadas simples e dupla, e suas aberturas (Fonte: Wells, 2005) .....	45
Figura 50. Edifício Debis: planta (Fonte: Wells, 2005) .....	45
Figura 45. Edifício Debis: átrio interno (Fonte: Wells, 2005), .....	45
Figura 48. Edifício Debis, em Berlin: detalhe da fachada dupla ventilada .....	45
Figura 51. Edifício GSW, em Berlin: vista geral do edifício. (Disponível em: < <a href="http://www.sauerbruchhutton.de">http://www.sauerbruchhutton.de</a> >. Acesso em: 18 julho 2009.).....	46
Figura 54. Edifício GSW: planta de um pavimento tipo de escritórios. (Fonte: LNBL, 2002).....	46
Figura 52. Edifício GSW: corte esquemático evidenciando a estratégia de ventilação natural dos escritórios. (Fonte: LNBL, 2002) .....	46
Figuras 55 e 56. Edifício GSW: interior de um escritório orientado a leste e vista externa de sua fachada. (Fonte: LNBL, 2002) .....	46
Figura 53. Edifício GSW: brises móveis na cavidade da fachada dupla ventilada (orientada a oeste). (Fonte: LNBL, 2002) .....	46
Figura 60. Deutsch Post; vista da cidade através do átrio. (Fonte: Etheridge & Ford, 2008) .....	48
Figura 57 – Deutsch Post, em Bonn, Alemanha: vista das fachadas norte, à esquerda, e sul, à direita (Fonte: Wells, 2005) .....	48
Figura 58. Deutsch Post: vista externa do edifício (Fonte: Wells, 2005).....	48

Figura 61. Deutsch Post, em Bonn, Alemanha: cavidade da fachada dupla ventilada, a norte (Fonte: Wells, 2005)	48
Figura 59. Deutsch Post; planta do pavimento tipo, mostrando a fachada dupla ventilada e os “sky courts”.(Fonte: Etheridge & Ford, 2008) .....	48
Figura 62. Vista de Londres simulando os edifícios: Heron Tower, Bishopsgate Tower e Leadenhall Street 122, quando construídos, ao lado do St. Marys Axe (Swiss Re), existente (respectivamente, da esquerda para a direita). (Disponível em: < <a href="http://www.skyscrapernews.com">http://www.skyscrapernews.com</a> >. Acesso em: 26 de outubro de 2008) .....	49
Figura 63. Edifício Swiss Re, em Londres: vista do exterior (Créditos: Klaus Bode).....	51
Figura 66. Edifício Swiss Re: átrio interno visto de seu pavimento superior; nota-se a presença de persianas incorporadas aos vidros das fachadas dos escritórios voltadas ao átrio .....	51
Figura 68. Edifício Swiss Re: planta de um pavimento tipo de escritórios (Créditos: Klaus Bode).....	51
Figura 64. Edifício Swiss Re: esquema conceitual dos átrios (Créditos: Klaus Bode).....	51
Figura 69 Edifício Swiss Re: aberturas na fachada dos átrios (Créditos: Klaus Bode).....	51
Figura 65. Edifício Swiss Re: vista do interior de um pavimento tipo, em direção ao átrio .....	51
Figura 67. Edifício Swiss Re: vista da fachada dupla ventilada em fase final de construção do edifício.....	51
Figura 70. Edifício Swiss Re: átrio interno visto de seu pavimento inferior.....	51
Figura 71. Edifício Heron Tower, em Londres: vista externa do edifício (Fonte: Wells, 2005) .....	52
Figuras 74 e 75. Edifício Leadenhall Street 122, em Londres: planta do pavimento tipo, à esquerda (Fonte: Planning Report PDU/0551/01, 2004); e perspectiva digital do projeto do edifício, à direita (Disponível em: < <a href="http://www.rsh-p.com">http://www.rsh-p.com</a> >. Acesso em: 02 de abril de 2008) .....	52
Figura 72. Edifício Heron Tower: corte esquemático da fachada de um escritório (Fonte: Gonçalves, 2003).....	52
Figura 73. Edifício Heron Tower: perspectiva esquemática de uma vila (Fonte: Gonçalves, 2003) .....	52
Figura 76. Edifício Bishopsgate Tower, em Londres: edifício no contexto urbano (Disponível em: < <a href="http://www.skyscrapernews.com/">http://www.skyscrapernews.com/</a> >. Acesso em: 26 outubro de 2008).....	54
Figura 78. Edifício Bishopsgate Tower, em Londres: corte esquemático, perspectiva e planta dos caixilhos que compõe a fachada dupla ventilada; originais do projeto (Fonte: Environmental Statement, 2006). .....	54
Figura 77. Edifício Bishopsgate Tower: planta de um pavimento tipo de escritórios (Fonte: Environmental Statement, 2006) .....	54
Figura 79. Edifício Aurora Place, em Sydney: implantação do edifício no contexto urbano (Fonte: Marcondes, 2004) .....	56
Figura 80. Edifício Aurora Place: detalhe da fachada dupla ventilada com a segunda pele aberta (Fonte: Marcondes, 2004) .....	56
Figura 85. Edifício CH2: seção com estratégias bioblímáticas (Fonte: City of Melbourne, 2008).....	58
Figura 81. Edifício CH2, em Melbourne: vista do edifício no contexto urbano (Fonte: City of Melbourne, 2008) ..	58
Figura 87. Edifício CH2: “shower towers” presentes na fachada Sul (Fonte: City of Melbourne, 2008) .....	58
Figura 82. Edifício CH2: brises de madeira pivotantes na fachada Oeste (Fonte: City of Melbourne, 2008) .....	58
Figura 88. Edifício CH2: planta do pavimento tipo de escritórios (Fonte: City of Melbourne, 2008).....	58

Figura 83. Edifício CH2: varandas com vegetação na fachada Norte (Fonte: City of Melbourne, 2008).....	58
Figura 86. Edifício CH2: interior de um ambiente de escritórios, com forro de concreto ondulado, exposto (Fonte: City of Melbourne, 2008) .....	58
Figura 84. Edifício CH2: painéis metálicos perfurados na fachada Leste (Fonte: City of Melbourne, 2008).....	58
Figuras 89 e 90. Shiodome Tower, em Tokyo: vista externa do edifício, à esquerda, e interior de uma vila de escritórios com jardim interno, à direita (Fonte: WGBC, 2007).....	60
Figura 91. Shiodome Tower: esquemas ilustrativos da estratégia de condicionamento ambiental em modo-misto para os escritórios (Fonte: WGBC, 2007) .....	60
Figura 92. Shiodome Tower, em Tokyo: esquemas ilustrativos da estratégia de ventilação natural dos escritórios, em corte e em planta (Fonte: WGBC, 2007).....	60
Figura 93. Edifício Plavinil-Elclor na Av. Paulista, em São Paulo (projeto arquitetônico de Rino Levi com colaboração de Paulo Bruna, 1961).....	63
Figura 95. Edifício Birmann 21 em São Paulo; projeto SOM, 1998 (Créditos: Gonçalves, 2003) .....	63
Figura 94. Edifício Copan, em São Paulo.(projeto da década de 1950 de Oscar Niemeyer com colaboração de Carlos Lemos) .....	63
Figura 96. Edifício Bank Boston, em São Paulo; projeto SOM, 2002 (Créditos: Steinkamp/ Ballogg) .....	63
Figura 97. Maquetes eletrônicas dos edifícios Rochaverá, Eldorado Business Tower, Prosperitas, E-Business, Ventura e Surubim (Fonte: Corbioli, 2007).....	67
Figura 98. Edifício Ventura: vista do interior de um pavimento de escritórios (Fonte: Figuerola, 2007).....	69
Figura 99. Edifício Ventura: detalhes de fixação do caixilho (Fonte: Figuerola, 2007) .....	69
Figura 100. Edifício Eldorado Business Tower: planta do pavimento tipo para a zona média de escritórios, com sugestão de layout (Créditos: S. Fornazari).....	71
Figura 103. Edifício Eldorado Business Tower: maquete eletrônica do edifício e seu entorno, nas diversas orientações (Créditos: S. Fornazari).....	71
Figura 101. Edifício Eldorado Business Tower: ilustração artística do <i>core</i> de serviços (Créditos: S. Fornazari) ..	71
Figura 104. Edifício Eldorado Business Tower: interior de um escritório com o edifício em construção; radiação incidente na fachada NE às 11h (abril de 2007). .....	71
Figura 105. Edifício Eldorado Business Tower: aspecto rosado do vidro branco com a incidência de radiação solar, visto do interior do ambiente, antes do fechamento com drywall.....	71
Figura 102. Edifício Eldorado Business Tower: vista exterior da fachada NE, observando-se a estrutura sob o vidro verde.....	71
Figura 106. Edifício Cidade Nova, no Rio de Janeiro: vista externa, fachada norte (Créditos: Celso Brando e Alex Ferro).....	73
Figura 109. Edifício Cidade Nova: corte esquemático da fachada dos escritórios (Fonte: material fornecido pela RRA Arquitetura para esta pesquisa) .....	73
Figuras 112 e 113. Edifício Cidade Nova, no Rio de Janeiro: vista da cobertura do átrio, com e sem as persianas internas (Créditos: Celso Brando e Alex Ferro).....	73
Figura 107. Edifício Cidade Nova: vista da fachada sudoeste (Créditos: Celso Brando e Alex Ferro).....	73

Figura 110. Edifício Cidade Nova: planta do pavimento tipo de escritórios (Fonte: material fornecido pela RRA Arquitetura para esta pesquisa) .....	73
Figura 111. Edifício Cidade Nova: vista da fachada dupla ventilada, com detalhe da abertura inferior para ventilação (Créditos: Celso Brando e Alex Ferro).....	73
Figura 108. Edifício Cidade Nova: vista externa da fachada nordeste (Créditos: Celso Brando e Alex Ferro) .....	73
Figura 114. Selo do programa WERS, atribuído a edifícios no Reino Unido. ....	88
Figura 115. Exemplo de etiqueta do RTQ atribuída aos edifícios avaliados. A etiqueta é dividida em quatro partes: envoltória, sistema de iluminação, sistema de condicionamento de ar e a edificação (ou parte desta) (Fonte: MME, 2009) .....	92
Figura 118. Instalação experimental para ensaios de fachadas duplas ventiladas no LNEC, em Portugal (Créditos: Alessandra Prata).....	94
Figuras 116 e 117. <i>Mock-ups</i> para ensaio de componentes de fachadas na <i>School of the Built Environment</i> da Universidade de Nottingham, Inglaterra.....	94
Figura 119. Túnel de vento do IPT em São Paulo para ensaios com modelos físicos (Créditos: Alessandra Prata) 94	94
Figura 121. Modelo de edifício de estudo utilizado por Carmody et al. (2004), e parâmetros analisados (Carmody et al., 2004).....	98
Figura 121. Resultado da simulação em CFD do modelo de escritórios estudado por Figueiredo (2007): vetores de velocidade do ar interna a 1,60m de altura (Fonte: Figueiredo, 2007) .....	99
Figuras 125 e 126. Modelo de edifício proposto por Figueiredo (2007): planta e corte do pavimento tipo (respectivamente) (Figueiredo, 2007) .....	107
Figuras 123 e 124. Modelo de edifício proposto por Benedetto (2007): perspectiva do edifício no programa de simulação, à esquerda; e detalhe da fachada de um pavimento tipo, à direita (Benedetto, 2007).....	107
Figura 122. Modelo de edifício proposto por Pirró (2005): perspectiva do escritório de análise (Pirró, 2005) ....	107
Figura 127. Modelo de edifício sugerido pelo IEA SHC T27 utilizado por Gratia & Herde (2004), adaptado para o contexto Belga: planta do pavimento tipo, acima; edifício de escritórios com e sem fachada dupla ventilada, respectivamente, abaixo.....	109
Figura 128. Tipos de janelas para edifícios de escritórios com ventilação natural (Fonte: CIBSE AM10, 2005, pág 26) .....	109
Figura 130. Modelos de edifício de referência, quadrado e retangular: corte dos edifícios .....	112
Figura 129. Modelos de edifício de referência, quadrado e retangular: planta dos pavimentos tipo .....	112
Figura 131. Modelos de edifício de referência: detalhe da fachada dos pavimentos tipo.....	112
Figura 132. Faixas de temperatura operativa aceitáveis para ambientes naturalmente condicionados de acordo com a temperatura média mensal e a porcentagem de ocupantes insatisfeitos, proposta pela norma ASHRAE 55 (2004) .....	120
Figura 133. Frequência de ocorrência de direção e velocidade do vento ao longo do ano de referência para São Paulo (Fonte: Benedetto, 2007) .....	122
Figura 134. Gráfico de temperatura do ar (TBS) anual a partir da base de dados climáticos de São Paulo.....	123
Figura 135. Gráfico de umidade relativa do ar (UR) anual a partir da base de dados climáticos de São Paulo .	123

Figura 136. Gráfico de radiação solar global anual a partir da base de dados climáticos de São Paulo .....	123
Figura 137. Distribuição de radiação solar global em plano vertical em São Paulo: orientação N (total diário) ..	124
Figura 138. Distribuição de radiação solar global em plano vertical em São Paulo: orientação NE (total diário)	124
Figura 139. Distribuição de radiação solar global em plano vertical em São Paulo: orientação L (total diário)...	124
Figura 140. Distribuição de radiação solar global em plano vertical em São Paulo: orientação SE (total diário)	125
Figura 141. Distribuição de radiação solar global em plano vertical em São Paulo: orientação S (total diário) ..	125
Figura 142. Distribuição de radiação solar global em plano vertical em São Paulo: orientação SO (total diário)	125
Figura 143. Distribuição de radiação solar global em plano vertical em São Paulo: orientação O (total diário) ..	126
Figura 144. Distribuição de radiação solar global em plano vertical em São Paulo: orientação NO (total diário)	126
Figura 145. Cenários de análise inseridos na carta solar da cidade de São Paulo (Latitude 23°30'S), de acordo com as orientações consideradas: exemplo de edifício com planta retangular e planta quadrada, e layout livre.....	128
Figura 146. Gráfico para determinação do incremento de vazão causado pelo excesso de área de uma abertura sobre a outra (Frota, 1995).....	131
Figura 147. Quadro de áreas das aberturas para cálculo de ventilação natural: vazão de ar por efeito chaminé; planta retangular e quadrada, com layout livre .....	132
Figura 148. Quadro de áreas das aberturas para cálculo de ventilação natural: vazão de ar por efeito chaminé; planta retangular e quadrada, com layout celular .....	133
Figura 149. Distribuição dos coeficientes de pressão ( $C_p$ ) em superfícies verticais em função da direção de incidência do vento (Sharag, 2006).....	137
Figura 150. Coeficientes de pressão para entrada ( $C_e$ ) e saída do ar ( $C_s$ ) calculados os modelos de edifício de referência, segundo método proposto por Sharag (2006) .....	137
Figura 151. Quadro de áreas das aberturas para cálculo de ventilação natural: vazão por efeito de vento; planta com layout livre.....	138
Figura 152. Quadro de áreas das aberturas para cálculo de ventilação natural: vazão por efeito de vento; planta com layout celular.....	139
Figura 153. Modelos geométricos no programa TAS: edifício retangular (à esquerda) e edifício quadrado (à direita), layout livre (acima) e layout celular (abaixo) .....	142
Figura 154. Seção dos modelos de edifícios, retangular e quadrado, respectivamente, com destaque para o escritório de análise: quinto pavimento tipo .....	142
Figura 155. Modelos geométricos no programa TAS: zonas de análise no 5° pavimento tipo, em destaque; plantas com layout livre, à esquerda, e plantas com layout celular, à direita .....	143
Figura 156. Valores de wwr e FS para fachadas dos cenários de edifícios com layout celular e vazão A (cenários 18, 22, 26 e 30), válidos para " $U_{\alpha} = 0,6$ " .....	164
Figura 157. Valores de wwr e FS para fachadas dos cenários de edifícios retangulares livres e vazão B (cenários 33, 34, 37, 38, 39 e 40), válidos para " $U_{\alpha} = 0,6$ " .....	164
Figura 158. Valores de wwr e FS para fachadas dos cenários do edifício quadrado livre NSLO na vazão B (cenários 41 a 44), válidos para " $U_{\alpha} = 0,6$ " .....	165
Figura 159. Valores de wwr e FS para fachadas dos cenários do edifício quadrado livre NE/SO/NO/SE na vazão B	

(cenários 45 a 48), válidos para “ $U_{x\alpha} = 0,6$ ” .....	165
Figura 160. Valores de $w_{wr}$ e FS para fachadas dos cenários de edifícios com layout celular e vazão B (cenários 49, 50, 54, 58 e 62), válidos para “ $U_{x\alpha} = 0,6$ ” .....	166
Figura 161. Ao x área mínima de janela para uma fachada dos cenários de edifícios de análise com vazão de ar por efeito de vento (Vazão B), por tipos de janela: planta retangular livre .....	170
Figura 162. Ao x área mínima de janela para uma fachada dos cenários de edifícios de análise com vazão de ar por efeito de vento (Vazão B), por tipos de janela: planta quadrada livre NSLO .....	171
Figura 163. Ao x área mínima de janela para uma fachada dos cenários de edifícios de análise com vazão de ar por efeito de vento (Vazão B), por tipos de janela: planta quadrada livre NE/SO/NO/SE .....	171
Figura 164. Ao x área mínima de janela para uma fachada dos cenários de edifícios de análise com vazão de ar por efeito de vento (Vazão B), por tipos de janela: planta quadrada e retangular com layout celular.....	172
Figura 165. Solução possível de fachada para o Cenário 18 - edifício de planta retangular, layout celular e orientação Sul; vazão de ar por efeito chaminé .....	174
Figura 166. Solução possível de fachada para o Cenário 22 - edifício de planta retangular, layout celular e orientação Sudoeste; vazão de ar por efeito chaminé .....	175
Figura 167. Solução possível de fachada para o Cenário 26 - edifício de planta quadrada, layout celular e orientação Sul; vazão de ar por efeito chaminé .....	175
Figura 168. Solução possível de fachada para o Cenário 30 - edifício de planta quadrada, layout celular e orientação Sudoeste; vazão de ar por efeito chaminé .....	176
Figura 169. Solução possível de fachada para o Cenário 33 - edifício de planta retangular, layout livre e orientação Norte; vazão de ar por efeito de vento .....	176
Figura 170. Solução possível de fachada para o Cenário 34 - edifício de planta retangular, layout livre e orientação Sul; vazão de ar por efeito de vento.....	177
Figura 171. Solução possível de fachada para o Cenário 37 - edifício de planta retangular, layout livre e orientação Nordeste; vazão de ar por efeito de vento .....	177
Figura 172. Solução possível de fachada para o Cenário 38 - edifício de planta retangular, layout livre e orientação Sudoeste; vazão de ar por efeito de vento.....	178
Figura 173. Solução possível de fachada para o Cenário 39 - edifício de planta retangular, layout livre e orientação Noroeste; vazão de ar por efeito de vento .....	178
Figura 174. Solução possível de fachada para o Cenário 40 - edifício de planta retangular, layout livre e orientação Sudeste; vazão de ar por efeito de vento.....	179
Figura 175. Solução possível de fachada para o Cenário 41 - edifício de planta quadrada, layout livre e orientação Norte; vazão de ar por efeito de vento .....	179
Figura 176. Solução possível de fachada para o Cenário 42 - edifício de planta quadrada, layout livre e orientação Sul; vazão de ar por efeito de vento.....	180
Figura 177. Solução possível de fachada para o Cenário 43 - edifício de planta quadrada, layout livre e orientação Leste; vazão de ar por efeito de vento .....	180
Figura 178. Solução possível de fachada para o Cenário 44 - edifício de planta quadrada, layout livre e orientação Oeste; vazão de ar por efeito de vento .....	181
Figura 179. Solução possível de fachada para o Cenário 45 - edifício de planta quadrada, layout livre e orientação	

Nordeste; vazão de ar por efeito de vento .....	181
Figura 180. Solução possível de fachada para o Cenário 46 - edifício de planta quadrada, layout livre e orientação Sudoeste; vazão de ar por efeito de vento.....	182
Figura 181. Solução possível de fachada para o Cenário 47 - edifício de planta quadrada, layout livre e orientação Noroeste; vazão de ar por efeito de vento .....	182
Figura 182. Solução possível de fachada para o Cenário 48 - edifício de planta quadrada, layout livre e orientação Sudeste; vazão de ar por efeito de vento.....	183
Figura 183. Solução possível de fachada para o Cenário 49 - edifício de planta retangular, layout celular e orientação Norte; vazão de ar por efeito de vento .....	183
Figura 184. Solução possível de fachada para o Cenário 50 - edifício de planta retangular, layout celular e orientação Sul; vazão de ar por efeito de vento.....	184
Figura 185. Solução possível de fachada para o Cenário 54 - edifício de planta retangular, layout celular e orientação Sudoeste; vazão de ar por efeito de vento.....	184
Figura 186. Solução possível de fachada para o Cenário 58 - edifício de planta quadrada, layout celular e orientação Sul; vazão de ar por efeito de vento.....	185
Figura 187. Solução possível de fachada para o Cenário 62 - edifício de planta quadrada, layout celular e orientação Sudoeste; vazão de ar por efeito de vento.....	185
Figura 188. Valores de wwr e FS para fachadas dos cenários de edifícios com layout celular e vazão A (cenários 18, 22, 26 e 30), válidos para “ $U_{x\alpha} = 1$ ” .....	228
Figura 189. Valores de wwr e FS para fachadas dos cenários de edifícios retangulares livres e vazão B (cenários 33, 34, 37, 38, 39 e 40), válidos para “ $U_{x\alpha} = 1$ ” .....	228
Figura 190. Valores de wwr e FS para fachadas dos cenários do edifício quadrado livre NSLO na vazão B (cenários 41 a 44), válidos para “ $U_{x\alpha} = 1$ ” .....	229
Figura 191. Valores de wwr e FS para fachadas dos cenários do edifício quadrado livre NE/SO/NO/SE na vazão B (cenários 45 a 48), válidos para “ $U_{x\alpha} = 1$ ” .....	229
Figura 192. Valores de wwr e FS para fachadas dos cenários de edifícios com layout celular e vazão B (cenários 49, 50, 54, 58 e 62), válidos para “ $U_{x\alpha} = 1$ ” .....	230

## Lista de Tabelas

Tabela 1. Resumo das estratégias bioclimáticas recomendadas para as diferentes cidades .....	30
Tabela 2. Dados de radiação solar global para as cidades analisadas: médias e máximas mensais, e total anual	33
Tabela 3. Frequência de ocorrência de iluminância no plano horizontal para 80% das horas do ano das cidades analisadas .....	35
Tabela 4. Transmitância térmica máxima de paredes externas (NBR 15220-3) .....	89
Tabela 5. Capacidade térmica de paredes externas (NBR 15220-3) .....	90
Tabela 6. Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas para a Zona Bioclimática 3 (NBR 15220-3, 2005) .....	90
Tabela 7. Tipos de vedações externas para a Zona Bioclimática 3 (NBR 15220-3, 2005) .....	90
Tabela 8. Estratégias de condicionamento térmico passivo para a Zona Bioclimática 3 (NBR 15220-3, 2005) ...	90
Tabela 9. Ganhos internos de calor em escritórios (Marcondes, 2004) .....	113
Tabela 10. Parâmetros de ocupação adotados para os modelos de referência .....	114
Tabela 11. Tabela resumo: Radiação solar global em plano vertical em São Paulo; total diário .....	126
Tabela 12. Cenários de análise .....	127
Tabela 13. Frequência de ocorrência de direção e velocidade de vento ao longo do ano de referência para São Paulo (apud Benedetto, 2007) .....	129
Tabela 14. Hora de referência para cálculo de ventilação natural e média dos dados do período de ocupação para horas do banco de dados com vento no quadrante Sul .....	129
Tabela 15. Cálculo de vazão de ar por efeito chaminé (vz A) pelo método BS5925(1991): resultados para planta livre e para as salas centrais de planta com layout celular .....	133
Tabela 16. Resultados do cálculo de vazão de ar por efeito chaminé (vz A) para os cenários de análise com método proposto por Frota & Schifer (1995) em comparação aos resultados obtidos com método da norma BS 5925 (1991) .....	134
Tabela 17. Valores de correção para cálculo da velocidade do vento, propostos pela BS 5925 (1991) .....	136
Tabela 18. Ambientes analisados e dados de velocidade do vento corrigidos; planta layout livre e celular .....	140
Tabela 19. Cálculo de vazão de ar por efeito de vento (vz B), método BS5925(1991): resultados .....	140
Tabela 20. Dados mínimos de vazão de ar no ambiente exigidos pela NBr 16401 para a atividade de escritório, por cenário de análise .....	141
Tabela 21. Resultados das avaliações de desempenho térmico e energético dos cenários de edifícios simulados para vazão de ar por efeito chaminé (vz A) e por efeito de vento (vz B) .....	146
Tabela 22. Vazão de ar de referência ( $\Phi$ ) e ganho máximo de calor pela fachada ( $Q_{f\text{máx}}$ ) para os vinte e três cenários de edifícios de escritórios avaliados que estão em conformidade com o critério de desempenho térmico.	155
Tabela 23. FS de alguns tipos vidros e elementos de proteção solar (elaborada a partir de Frota & Schiffer, 1995; Lamberts et al., 1997; e Carmody, 2004) .....	158

Tabela 24. Influência do wwr nos ganhos de calor e no desempenho térmico do ambiente de escritórios; análise comparativa para o edifício retangular livre NS: porcentagem anual de conforto e ganho de calor solar total anual ( $Q_{\text{anual}}$ ) .....	159
Tabela 25. Valores de Rad ( $W/m^2$ ) e $h_{e^{-1}}$ ( $W/m^2\text{°C}$ ) para hora de $Q_{\text{fmáx}}$ dos respectivos cenários de análise .	161
Tabela 26. Resultados de ganho de calor para uma mesma fachada: cálculo com método proposto em Frota (1995) e valores extraídos das simulações computacionais com o programa TAS .....	162
Tabela 27. Valores de $Q_{\text{fmáx}}$ corrigidos para utilização na equação de ganho de calor proposta em Frota (1995)	163
Tabela 28. Tipos de janela e área de abertura efetiva considerada .....	169
Tabela 29. $V$ , $\sqrt{\Delta C_p}$ , $\Delta T$ e $\Delta T_1$ para os cenários de análise que atingiram o critério (assumindo que o coeficiente de amortecimento “m”, relacionado à inércia térmica do ambiente, permanece 0,6) .....	172
Tabela 30. Wwr e área máxima de janela contida na superfície transparente da fachada, por configuração de edifício .....	173
Tabela 31. Máxima temperatura do ar interna aceita para quatro cenários de edifícios de escritórios da pesquisa com base no modelo adaptativo de conforto da norma ASHRAE 55 (2004) .....	196
Tabela 32. Resultado detalhado do cálculo de vazão de ar por feito chaminé, segundo método proposto em Frota & Schiffer (1995).....	225
Tabela 33. Resultado detalhado da avaliação de desempenho térmico dos cenários de edifícios com simulação computacional .....	227

## Lista de Reduções

$a$  = parâmetro em função do perfil do terreno, adimensional

$AA$  = aquecimento artificial

$Ab_{ef}$  = abertura efetiva para ventilação natural, em  $m^2$

$Ach$  = área equivalente de aberturas para vazão de ar por efeito chaminé, em  $m^2$

$Ae$  = área de entrada do ar, em  $m^2$

$A_{escr}$  = área útil de escritórios do pavimento tipo do edifício, em  $m^2$

$A_{fach}$  = área de uma fachada do pavimento tipo do edifício, em  $m^2$

$AJ$  = área da superfície da janela, em  $m^2$

$Ao$  = área equivalente de aberturas para vazão de ar por efeito de vento, em  $m^2$

$Aop$  = área do componente opaco da fachada, em  $m^2$

$As$  = área de saída do ar, em  $m^2$

$ASP$  = estratégia de aquecimento solar passivo

$A_T$  = área total de piso do pavimento tipo do edifício, em  $m^2$

$AT_{fach}$  = área total das fachadas do pavimento tipo do edifício, em  $m^2$

$Atr$  = área do componente transparente ou translúcido da fachada, em  $m^2$

$CA$  = condicionamento artificial

$Cd$  = coeficiente de perda de carga da abertura, adimensional

$Ce$  = coeficiente de entrada de ar na abertura, adimensional

$Cp$  = coeficientes de pressão nas aberturas, adimensional

$Cs$  = coeficiente de saída de ar na abertura, adimensional

$CS$  = coeficiente de sombreamento, adimensional

$CT$  = capacidade térmica, em  $KJ/m^2K$

$e$  = espessura, em  $m$

$FS$  = fator solar, adimensional

$H_1$  = distância entre o centro das aberturas de entrada e saída do ar, em  $m$

$hc$  = coeficiente de trocas térmicas por convecção, em  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$

$he$  = coeficiente de condutância térmica da superfície externa do componente, em  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$

$H_{m\acute{a}xJ}$  = altura máxima da janela, em  $m$

$hr$  = coeficiente de trocas térmicas por radiação, em  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$

$J$  = janela para ventilação natural

$J_{quad}$  = janela do modelo de edifício com planta quadrada

$J_{ret}$  = janela do modelo de edifício com planta retangular

$K$  = parâmetro em função do perfil do terreno, adimensional

$l_{máx}$  = largura máxima da fachada, em m

$m$  = coeficiente de amortecimento, vinculado à inércia do ambiente, adimensional

met =

MTA = massa térmica para aquecimento

MTR = massa térmica para resfriamento

OTn = temperatura operativa neutra, em °C

pd = pé direito livre interno, em m

$pd_T$  = pé direito total, de piso a piso, em m

PMV = voto médio estimado, adimensional

PPD = porcentagem de pessoas insatisfeitas

$Q$  = ganho de carga térmica devido a radiação solar, em W

$Q_f$  = ganho de carga térmica devido a radiação solar por área de fachada, em W/m<sup>2</sup>fach

$Q_{f máx}$  = ganho máximo de carga térmica por área de fachada, devido à radiação solar, para horas em conforto, em W/m<sup>2</sup>fach

$Q_{op}$  = ganho de carga térmica devido à radiação solar em superfície opaca, em W

$Q_{T annual}$  = ganho de carga térmica total anual devido a radiação solar, em MW

$Q_{tr}$  = ganho de carga térmica devido à radiação solar em superfície transparente ou translúcida, em W

Rad = radiação solar global incidente na superfície, em W/m<sup>2</sup>

RE = estratégia de resfriamento evaporativo

SVVIE = sistemas de vedações verticais internas e externas

TBS = temperatura de bulbo seco do ar, em °C

TL = transmissão luminosa, adimensional

tmm = temperatura média mensal, em °C

$T_o$  = temperatura operativa, em °C

TRM = temperatura radiante média do ambiente, em °C

$U$  = coeficiente global de transmissão térmica, em W/m<sup>2</sup>°C

UR = umidade relativa do ar, em %

$V$  = velocidade do ar externo, corrigida em função da direção de incidência, em m/s

$v_{ext}$  = velocidade do vento registrada na estação meteorológica, a 10m de altura, em m/s

$V_o$  = velocidade do ar externo corrigida para as características do tecido urbano e da altura do ponto de análise, em m/s

$Z$  = altura do ponto onde se deseja determinar a velocidade do vento, em m

ZC = zona de conforto térmico

ZV = zona com recomendação da estratégia de ventilação

$\alpha$  = absorvidade da superfície, adimensional

$\Delta C_p$  = diferença entre os coeficientes de pressão de entrada e saída de ar na abertura, adimensional

$\Delta T$  = diferença entre a temperatura do ar interna e externa, em °C

$\Phi$  = vazão de ar, em m<sup>3</sup>/s ou em vol/h

$\Phi_{ch}$  = vazão de ar por efeito chaminé, em m<sup>3</sup>/s ou em vol/h

$\Phi_v$  = vazão de ar por efeito de vento, em m<sup>3</sup>/s ou em vol/h

$\Theta$  = ângulo de incidência do vento com relação à abertura, em °



## Resumo

MARCONDES, M. P. Soluções projetuais de fachadas para edifícios de escritórios com ventilação natural em São Paulo. 244p. Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

A pesquisa parte da hipótese de que, sob as condições climáticas da cidade de São Paulo, a solução de fachada de um edifício de escritórios, com projeto arquitetônico aprimorado para o desempenho térmico com ventilação natural e uso eficiente (carga térmica interna de  $32\text{W/m}^2$ ), proporciona condições de conforto térmico nos ambientes de trabalho por no mínimo 80% das horas ocupadas do ano sem uso de condicionamento artificial. O objetivo geral é a identificação de soluções projetuais de fachada para edifícios de escritórios com ventilação natural em São Paulo com programa de necessidades, projeto arquitetônico e implantação definidos, tendo em vista o aprimoramento do desempenho térmico do edifício para o conforto térmico dos ocupantes. Levantou-se exemplos de edifícios de escritórios recentes que aclamam ser térmica e energeticamente eficientes para seus contextos, e métodos de avaliação de desempenho térmico e energético de fachadas e de edifícios de escritórios, com destaque para a ventilação natural. Com base em dois modelos de edifício de referência elaborados, sessenta e quatro cenários de edifícios de escritórios com diferentes configurações e condições de ventilação foram avaliados com simulação térmica anual, considerando o clima de São Paulo. Para cada cenário de edifício estabeleceu-se uma relação, adequada às condições desejáveis de conforto térmico dos usuários, entre uma vazão de ar de referência e o ganho máximo de calor no ambiente através da fachada. Os resultados das simulações deram subsídios para o projeto de soluções possíveis de fachadas para os vinte e três casos de edifícios de escritórios que apresentaram no mínimo 80% das horas ocupadas no ano em conforto. Os produtos finais da tese são: (I) dois modelos de edifício de escritórios de referência, com características arquitetônicas e parâmetros de ocupação aprimorados para o desempenho térmico da edificação com ventilação natural sob o clima de São Paulo; (II) método de avaliação de desempenho térmico de edifícios de escritórios com ventilação natural; (III) procedimento para o dimensionamento de soluções de fachada para edifícios de escritórios com ventilação natural; (IV) soluções projetuais de fachada para edifícios de escritórios com ventilação natural e desempenho térmico aprimorado.

Palavras-chave: edifícios de escritórios, ventilação natural, conforto térmico, fachadas, São Paulo



## Abstract

MARCONDES, M. P. Façades' design solutions for office buildings with natural ventilation in São Paulo. 244p. Thesis (Doctoral). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

The research starts from the hypothesis that, under the climatic conditions of the city of São Paulo, the façade's solution of an office building, with an improved architectural design for thermal performance with natural ventilation and an efficient use (internal thermal load of  $32\text{W/m}^2$ ), provides thermal comfort conditions at the work spaces for at least 80% of the occupied hours during the year without use of artificial air conditioning. The main objective is to identify façades' design solutions for office buildings with natural ventilation in São Paulo with program of activities, architectural design and site plan defined, considering the improvement of the thermal performance of the building for occupant thermal comfort. Recent examples of office buildings which claim to be thermal and energy efficient to their contexts, and methods of thermal and energy performance evaluation of façades and office buildings, with emphasis on natural ventilation, were listed. Based on two proposed reference models of buildings, sixty four scenarios of office buildings with different configurations and ventilation conditions were evaluated with thermodynamic simulations, considering the climate of São Paulo. For each scenario it was established a relationship, in accordance with users' acceptable thermal comfort conditions, between a reference ventilation rate and the maximum heat gain in the office through the façade. The results of the simulations provided inputs for the design of possible façade's solutions for twenty three cases of office buildings which presented at least 80% of the annual occupied hours in comfort. The final products of the thesis are: (I) two reference models of office buildings, with architectural design and occupational parameters enhanced for the building thermal performance with natural ventilation under the climatic conditions of São Paulo; (II) thermal performance evaluation method for office buildings with natural ventilation; (III) procedure for the design of façade's solutions for office buildings with natural ventilation; (IV) façade's design solutions for office buildings with natural ventilation and improved thermal performance.

Keywords: office buildings, natural ventilation, thermal comfort, façades, São Paulo



# Introdução

A crise energética internacional da década de 1970 impulsionou a discussão sobre questões de impacto ambiental e energético em escala global.

A conferência internacional das Nações Unidas realizada no Rio de Janeiro em 1992 (United Nations Conference on Environment and Development - UNCED), também conhecida como “Eco 92”, atentou para os danos irreversíveis ao planeta fruto das ações humanas, principalmente relacionadas ao uso impróprio e abusivo dos recursos naturais e energéticos. Estudos científicos anteriores já alertavam para tal fato, mas os efeitos das mudanças climáticas, com ênfase para o aquecimento global, foram experimentados apenas no século XX (Gauzin-Müller, 2002).

Um plano de desenvolvimento para o século XXI foi elaborado na UNCED 92, a chamada “Agenda 21”, na qual se recomendava uma atitude integrada dos países participantes englobando as esferas ambiental, econômica e social, em prol de um “desenvolvimento sustentável”<sup>[1]</sup> no planeta. A conferência seguinte, UNCED 96, promulgou o “Protocolo de Kyoto”, documento cujo objetivo consistia na obtenção de medidas mais concretas, em três quesitos principais: redução do consumo dos recursos naturais e energéticos, diminuição da taxa de emissões de CO<sub>2</sub> e redução na produção de resíduos sólidos (Gauzin-Müller, 2002).

O panorama energético internacional atual aponta que 81% da energia consumida no mundo provem de fontes não renováveis (IEA, 2009)<sup>[2]</sup>. Previsões do Setor de Informações Energéticas do Departamento de Energia do governo norte-americano (DOE/EIA) indicam um aumento de 44% no consumo de energia total mundial até 2030<sup>[3]</sup> (EIA, 2009), como ilustra a Figura 1.

O impacto das questões ambientais e energéticas nos setores relacionados à arquitetura e à construção dos edifícios é traduzido no estabelecimento de metas de redução do consumo energético e limite das emissões de CO<sub>2</sub>, para os países desenvolvidos e em desenvolvimento. Paralelamente, observa-se a tímida expansão da discussão iniciada em países europeus em prol de condições adequadas de conforto ambiental aos usuários das edificações, inclusive para a tipologia de edifícios comerciais ou edifícios de escritórios.

A respeito dos edifícios de escritórios, essa tipologia é caracterizada por alta geração de carga térmica interna inerente ao seu uso/atividade, com concentração de pessoas e equipamentos. A arquitetura dos modelos correntes de edifícios de escritórios

[1] O termo “desenvolvimento sustentável” é empregado pela primeira vez em um documento internacional produzido pelas Nações Unidas em 1987, chamado Brundtland Report, também conhecido como Nosso Futuro Comum.

[2] Consumo de energia total final mundial com base em dados de 2007, dos quais: óleo cru e derivados de petróleo (42,6%), gás (15,6%), carvão e derivados (8,8%), eletricidade (14%) (IEA, 2009).

[3] A previsão de aumento no consumo total de energia mundial considera uma participação maior das economias em desenvolvimento ou países não pertencentes ao OECD (Organization for Economic Cooperation and Development), dentre os quais se inclui o Brasil, com destaque para a China e a Índia. Os dados apresentados consideram uma participação dos países da OECD (incluindo países norte-americanos, europeus e asiáticos) de 51% no consumo total de energia mundial em 2006, passando para 41% em 2030 de acordo com a previsão realizada (EIA, 2009).

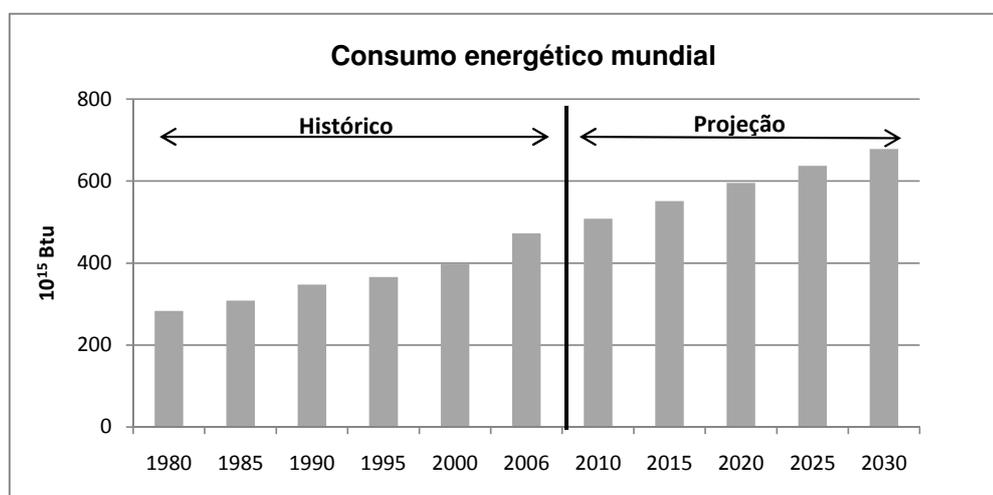


Figura 1. Previsão de consumo energético mundial até 2030 (Fonte: International Energy Outlook 2009, DOE/IEA 2009)

[4] Segundo Gauzin-Müller (2002), de 20% a 60% da demanda de energia de um edifício refere-se à provisão de ventilação.

[5] As energias renováveis incluem energia hidráulica e eletricidade (13,8%), lenha e carvão vegetal (11,6%), produtos da cana-de-açúcar (16,4%) e outras renováveis (3,5%) (Ministério de Minas e Energia, 2009).

[6] As fontes renováveis de energia elétrica compreendem: hidráulica (80%), biomassa – incluindo lenha, bagaço de cana, lixívia e outras recuperações (5,3%) e eólica (0,1%) (MME, 2009).

[7] Segundo a classificação climática proposta por Köppen, a cidade de São Paulo apresenta clima “temperado úmido com verão quente” ou “subtropical úmido sem estação seca definida” - Cfa (Peel et al., 2007)

[8] Vide item 1.1.2 da tese.

[9] Informação fornecida pelo Prof. Dr. Marcelo Romero em palestra realizada no dia 23 de novembro de 2006 na FAU-USP, como parte do Workshop “Environment, Energy and Sustainable Design: Building and Urban Spaces. Ambiente e Energia: Projeto Para Edifícios e Espaços Urbanos Mais Sustentáveis”.

projetados e construídos em escala global ainda é primordialmente baseada no padrão comercial internacional, com uso abundante de vidro em fachadas seladas. Tal configuração de edifício implica em ganhos adicionais de carga térmica proveniente da radiação solar incidente - o que pode ser desejável (ou não) dependendo do clima local e da ocupação específica -, e na adoção generalizada de sistemas prediais de condicionamento ambiental. A somatória desses fatores tem consequências diretas no consumo energético e no desempenho térmico dos escritórios.

Apontam-se a carga térmica interna, o clima externo, o projeto arquitetônico e as condições aceitáveis de conforto térmico como alguns dos principais parâmetros a influenciar o desempenho térmico e a eficiência energética dos edifícios de escritórios. O projeto arquitetônico apresenta um papel fundamental como elemento de conexão entre os demais parâmetros, com potencial de equalização dos decorrentes impactos no ambiente interno.

Tendo em vista a produção de edifícios mais sustentáveis, confortáveis para seus ocupantes e energeticamente eficientes para seus contextos, o uso de estratégias passivas de condicionamento ambiental aparece como alternativa a ser investigada. As estratégias passivas são aquelas que não dependem de meios ativos ou artificiais para sua implementação, como por exemplo, a iluminação natural, a ventilação natural, o uso da inércia térmica para arrefecimento, o resfriamento evaporativo, entre outras.

A ventilação natural é considerada uma das estratégias de projeto mais eficientes para prover condições adequadas de conforto térmico aos ocupantes dos edifícios de modo energeticamente eficiente<sup>4</sup> (Bittencourt & Cândido, 2005; Etheridge & Ford, 2008). Santamouris (1998) destaca o efeito do movimento do ar em incrementar a perda de calor do corpo humano por convecção e evaporação, e a influência da turbulência do ar na sensação de conforto térmico.

Além de proporcionar conforto térmico, a ventilação natural de edifícios pode cumprir outras funções, como a provisão de taxas mínimas de renovação do ar, em atendimento a requisitos de salubridade; e promover o resfriamento passivo. Perante as exigências humanas básicas, a ventilação dos ambientes desempenha papel fundamental no suprimento de oxigênio e na diluição da concentração de gás carbônico (Frota & Schiffer, 1995). O emprego da ventilação natural como estratégia de projeto para o resfriamento passivo dos ambientes, por sua vez, é um artifício especialmente vantajoso para os edifícios de escritórios, à medida que remove o excesso de carga térmica interna proveniente tanto da ocupação quanto dos ganhos solares, e dissipa a umidade do ar, reduzindo ou excluindo a necessidade do uso de sistemas prediais de condicionamento ambiental.

Assim como as demais estratégias passivas, o(s) período(s) de aplicação da ventilação natural ao longo do ano e sua eficiência vão depender das características específicas de cada edifício (arquitetônicas, construtivas e funcionais) e do potencial do clima local.

Abordando o cenário brasileiro, pode-se dizer que o país não é um grande consumidor de energia perante o contexto internacional. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), a participação de toda a América Latina no consumo de energia total mundial foi de apenas 5,1% em 2007 (IEA, 2009), Figura 2.

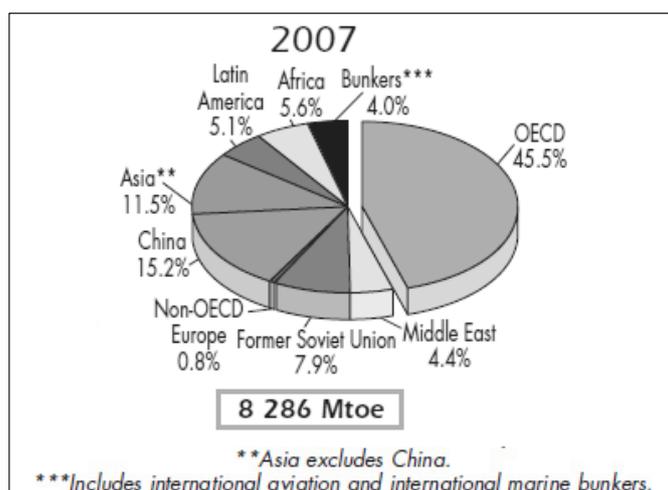
De acordo com o Balanço Energético Nacional de 2009 (BEN 2009), 45,3% da matriz energética brasileira é composta por energia de fontes renováveis<sup>5</sup>, o que reflete, juntamente ao montante de consumo, em uma taxa reduzida de emissão de CO<sub>2</sub> per capita (1,78 tCO<sub>2</sub>/hab) em comparação a países como os Estados Unidos e o Japão (19 tCO<sub>2</sub>/hab e 9,49 tCO<sub>2</sub>/hab, respectivamente) (MME, 2009).

Com relação ao consumo energético dos edifícios de escritórios nacionais, o BEN 2009 informa que 86,6% da energia final consumida pelo setor comercial (o qual inclui os edifícios de escritórios) refere-se à energia elétrica, dos quais 85,4% provém de fontes renováveis<sup>6</sup>. No entanto, a curva de evolução do consumo para o setor indica

uma taxa de crescimento em ascensão nos últimos anos (Figura 3), fato que somado à tendência de crescimento do consumo energético pelos países ou economias em desenvolvimento, aponta para a implementação de medidas para reduzir o consumo e para direcionar a expansão no uso de recursos energéticos renováveis.

A cidade de São Paulo se destaca como pólo econômico e financeiro do país, concentrando população, negócios e edifícios de escritórios. Os edifícios de escritórios projetados e construídos na cidade nas últimas duas décadas seguem o modelo da arquitetura internacional anteriormente citado, com diversos exemplos do tipo “caixa de vidro” selada e dependência de sistemas para condicionamento ambiental, ainda que as condições climáticas<sup>7</sup> se mostrem favoráveis à utilização de estratégias passivas, com ocorrência de temperaturas amenas por cerca de 70% do ano<sup>8</sup>. Segundo Romero (2006), pesquisas realizadas em edifícios de escritórios operantes em São Paulo apontam que o uso de sistemas de condicionamento de ar e de iluminação artificial são responsáveis por cerca de 50% da energia elétrica total consumida (informação verbal)<sup>9</sup>.

Diversos estudos e pesquisas (Arnold, 1996; Ghiaus, 2003; Gratia & Herde, 2003, 2007a; Rijal et al., 2007; Etheridge & Ford, 2008; Yao et al, 2009, entre outros) vem sendo desenvolvidos internacionalmente com o objetivo de investigar a aplicação da ventilação natural em edifícios de escritórios, como estratégia para reduzir o consumo energético da edificação.



Mtoe = mega tonelada equivalente de petróleo; 1Mtoe =  $3,968 \times 10^7$  MBtu

Figura 2. Consumo energético total mundial em 2007, por região, em Mtoe (Fonte: IEA, 2009)

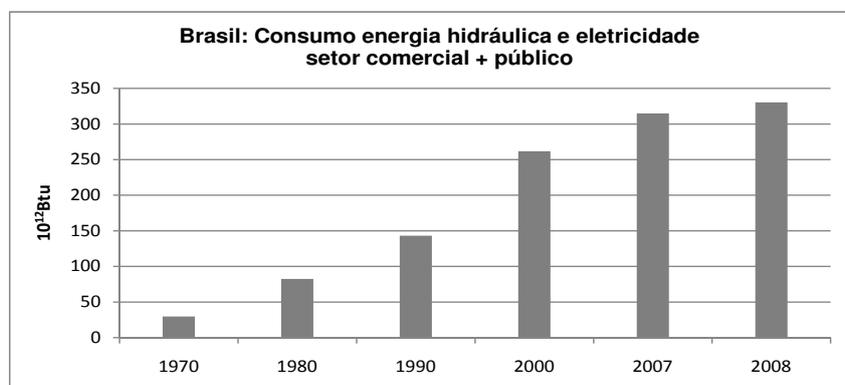


Figura 3. Evolução do consumo de energia hidráulica e eletricidade no Brasil: Setor Comercial e Público (Fonte: BEN 2009, MME 2009)

Adicionalmente, verificou-se a existência de novos edifícios de escritórios funcionando com ventilação natural em algumas cidades do mundo, como as alemãs Berlin, Bonn e Frankfurt Am Main, as australianas Melbourne e Sydney, e a japonesa Tokyo.

No cenário nacional, estudos recentes (Marcondes, 2004; Benedetto, 2006; Figueiredo, 2007) apontaram a possibilidade de ventilação natural de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo por partes do ano, indicando um potencial de aplicação dessa estratégia por até 83% do ano (Figueiredo, 2007), dependendo do modelo de edifício e de sua condição de exposição.

Considerando o projeto arquitetônico dos edifícios de escritórios, via de regra conformados por pavimentos tipo, destaca-se o papel da fachada como elemento de interface entre o ambiente interno e o exterior, com potencial de controlar os mecanismos de trocas térmicas no edifício, permitindo a entrada da radiação solar (luz e calor) e controle da ventilação natural, e, portanto, exercendo influência considerável no desempenho térmico e energético da edificação e no conforto térmico dos usuários (Carmody et al., 2004; Pirró, 2005; Steec & Passen, 2005; Hoseggen et al., 2007; entre outros).

Enfatiza-se, desse modo, a importância das fachadas na investigação sobre o potencial de ventilação natural dos edifícios de escritórios na cidade de São Paulo.

### **Hipótese**

A tese parte da hipótese de que, sob as condições climáticas da cidade de São Paulo, a solução de fachada de um edifício de escritórios, com projeto arquitetônico aprimorado para o desempenho térmico com ventilação natural e uso eficiente (carga térmica interna de  $32\text{W/m}^2$ ), proporciona condições de conforto térmico nos ambientes de trabalho por no mínimo 80% das horas ocupadas do ano sem uso de condicionamento artificial.

### **Objetivos**

O objetivo geral do trabalho é a identificação de soluções projetuais de fachada para edifícios de escritórios com ventilação natural na cidade de São Paulo com programa de necessidades (características de uso e ocupação), projeto arquitetônico (forma, dimensões, configuração de pavimento tipo) e implantação (orientação solar e aos ventos) definidos, tendo em vista o aprimoramento do desempenho térmico do edifício para o conforto térmico dos seus ocupantes.

Arelado ao objetivo principal, um objetivo específico da pesquisa é identificar um modelo de edifício de escritórios com projeto arquitetônico e parâmetros de ocupação aprimorados para o desempenho térmico do edifício com ventilação natural na cidade de São Paulo.

Nota: Cabe mencionar que o desempenho acústico, luminoso e econômico (custos financeiros) das fachadas não são objetivos desta pesquisa. Além disso, a discussão é baseada nas condições climáticas locais, não abordando questões de poluição sonora e do ar. Comentários sobre esses aspectos são realizados na contextualização do trabalho, quando pertinente.

### **Método**

O método utilizado consiste:

1. No levantamento de exemplos nacionais e internacionais de edifícios de escritórios entre o final de década de 1990 e o início dos anos 2000 que argumentam apresentar um projeto arquitetônico com desempenho ambiental e energético aprimorado, frente aos contextos climáticos específicos; ênfase nos edifícios com ventilação natural;
2. Em elencar métodos de avaliação de desempenho térmico e energético de fachadas e de edifícios de escritórios (procedimentos, critérios e indicadores de desempenho,

ferramentas de avaliação) e referentes aspectos normativos, com especial interesse naqueles que abordam a ventilação natural;

3. Na definição de modelos de edifício que representem edifícios de escritórios com desempenho térmico aprimorado para a ventilação natural sob as condições climáticas da cidade de São Paulo;

4. Na avaliação de desempenho térmico, com ferramenta de simulação computacional, de modelos de edifício de escritórios naturalmente ventilados, considerando o clima da cidade de São Paulo;

5. No estabelecimento de uma relação, que seja adequada às condições desejáveis de conforto térmico para os usuários dos escritórios, entre uma vazão de ar possível e o ganho de calor (carga térmica) máximo no ambiente pela fachada do edifício;

6. Na proposição de soluções projetuais de fachadas para edifícios de escritórios com ventilação natural e desempenho térmico aprimorado para a cidade de São Paulo.

## Produtos

Os produtos da tese são: (I) dois modelos de edifício de escritórios de referência, com características arquitetônicas e parâmetros de ocupação aprimorados para o desempenho térmico da edificação com ventilação natural diante das condições climáticas de São Paulo; (II) método de avaliação de desempenho térmico de edifícios de escritórios com ventilação natural; (III) procedimento para o dimensionamento de soluções de fachada para edifícios de escritórios com ventilação natural; (IV) diversas soluções projetuais de fachada para edifícios de escritórios com ventilação natural e desempenho térmico aprimorado.

## Estrutura do Trabalho

A Tese está organizada em sete capítulos:

O capítulo 1 trata da arquitetura de um conjunto de edifícios de escritórios nacionais e internacionais da geração compreendida entre o final da década de 1990 e o início dos anos 2000, os quais aclamam apresentar projetos arquitetônicos ambientalmente e energeticamente eficientes, frequentemente divulgados como “ícones da sustentabilidade”, para os contextos nos quais estão inseridos. O conceito de conforto térmico e seus requisitos para usuários de edifícios sob atividade de escritórios é discutido, tendo em vista os condicionantes do espaço interno e sua relação com o clima externo. É realizada uma análise e diagnóstico das condições climáticas das principais cidades de implantação dos edifícios comentados, fazendo um contraponto entre elas, com destaque para suas principais características e requisitos de projeto para obtenção de conforto térmico no interior dos edifícios. Com o objetivo de investigar a incorporação da ventilação natural e o aprimoramento do desempenho térmico dos edifícios de escritórios, dezesseis exemplos principais são apresentados, comentando-se as características do modelo de edifício e os principais elementos e estratégias considerados para o seu projeto e a sua operação.

O capítulo 2 elenca métodos de avaliação de desempenho térmico e energético de fachadas e de edificações, enfatizando-se aqueles aplicados a edifícios de escritórios naturalmente ventilados. Os procedimentos empregados são descritos, especificando-se os critérios de desempenho, os índices de conforto e as ferramentas utilizadas. No que tange aos critérios de desempenho, os exemplos são comentados conforme dois grupos ou categorias de indicadores verificados: o primeiro diz respeito ao elemento “fachada” isolado, e o segundo avalia o desempenho do edifício considerando a influência da fachada. É salientada a existência de normas e/ou regulamentações técnicas referentes ao desempenho térmico e/ou energético de fachadas de edifícios nos contextos nacional e internacional. A ampla utilização de ferramentas de simulação computacional para avaliação do desempenho térmico e energético de edifícios e suas fachadas é abordada, mencionando-se as referências mais utilizadas.

No capítulo 3, dois modelos de edifícios são elaborados, como referência a um edifício de escritórios com desempenho térmico aprimorado para ventilação natural sob as condições climáticas de São Paulo. O processo de definição dos modelos de referência é descrito, e suas características arquitetônicas (incluindo: altura, forma, configuração da planta do pavimento tipo – áreas, layout interno, pé direito e profundidade) e parâmetros de ocupação são apresentados.

O capítulo 4 apresenta uma avaliação de desempenho térmico de edifícios de escritórios com ventilação natural, sob o contexto climático de São Paulo. É proposto um método de avaliação que inclui: a realização de cálculos de ventilação natural para estimativa de uma vazão de ar de referência para os escritórios e a realização de simulações computacionais anuais de desempenho térmico para os modelos de edifício de referência elaborados. As simulações computacionais são realizadas com o software TAS (EDSL, 2009) compreendendo as 8.760 horas de um ano de estudo, com base de dados climáticos da cidade de São Paulo. Os resultados das simulações computacionais são avaliados conforme a porcentagem das horas ocupadas do ano em conformidade com as condições aceitáveis de conforto térmico (horas em conforto), de acordo com o critério estabelecido, e são analisados os ganhos de calor no ambiente de escritórios através da fachada.

O capítulo 5 propõe um procedimento para o projeto de soluções de fachada para edifícios de escritório com ventilação natural e desempenho térmico aprimorado, sob as condições climáticas de São Paulo. Exemplos de soluções possíveis de fachada são apresentados para os cenários de edifício analisados no trabalho nos quais a ventilação natural é possível por no mínimo 80% do ano, com base nos resultados da avaliação de desempenho térmico realizada no capítulo 4.

As conclusões sobre a tese, validando a hipótese inicial e confirmando a satisfação dos objetivos da pesquisa, são apresentadas no Capítulo 6. Considerações Finais a respeito do trabalho e com relação ao edifício de escritórios com ventilação natural e suas fachadas são colocadas. Adicionalmente, sugestões de prosseguimento da pesquisa e de desenvolvimento de estudos futuros no tema são realizadas.

As referências bibliográficas citadas e consultadas para elaboração da tese constam do capítulo 7.

No intuito de contribuir para o melhor entendimento do trabalho, a Figura 4 apresenta uma síntese do caminho percorrido para o desenvolvimento da tese, com associação dos capítulos correspondentes.

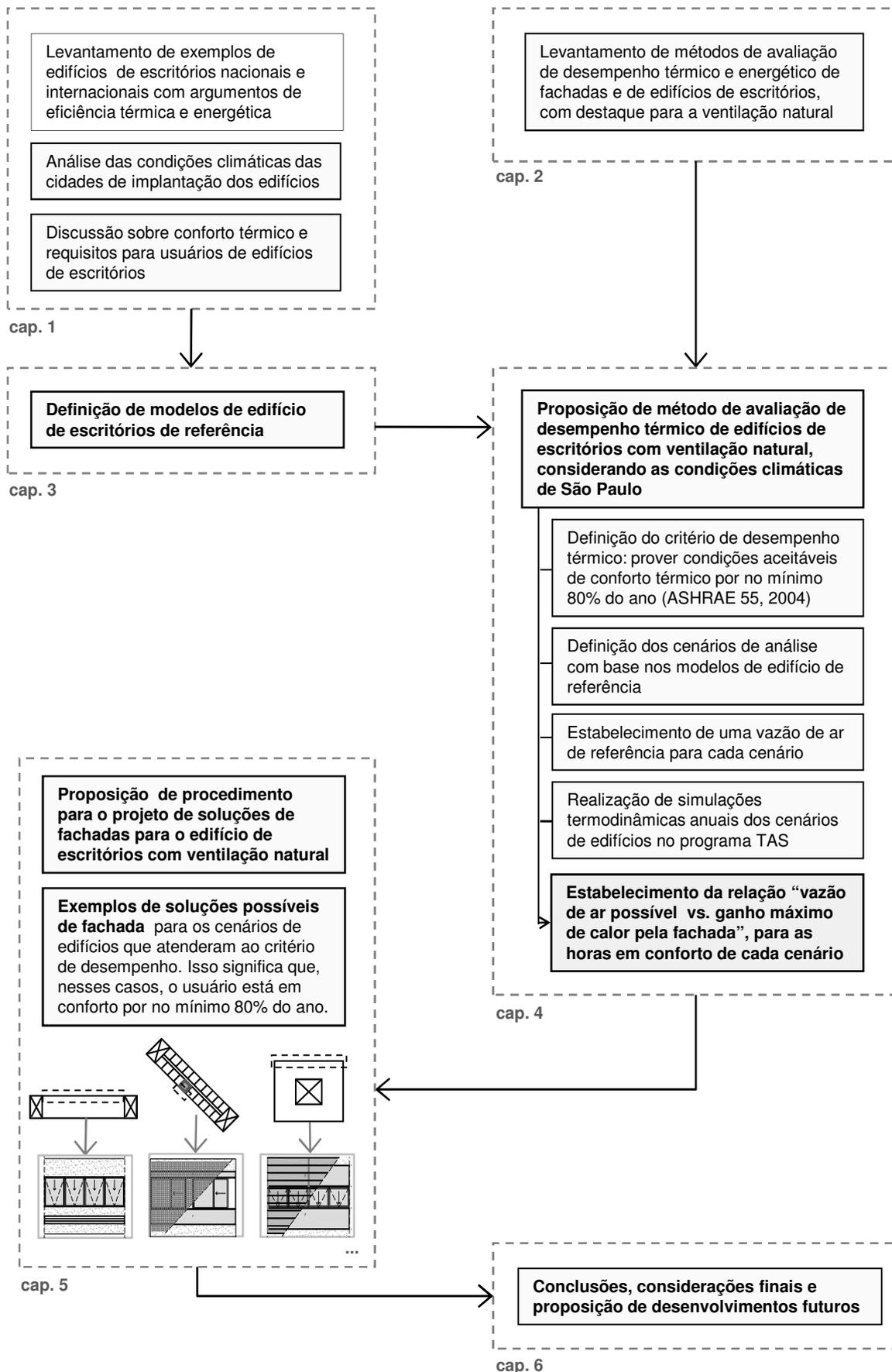


Figura 4. Etapas de desenvolvimento desta pesquisa



# Capítulo 1



## Capítulo 1. A Geração de edifícios de escritórios da década de 1990 ao início dos anos 2000.

A necessidade do projeto e da construção de edifícios mais sustentáveis, energeticamente eficientes e ambientalmente conscientes para seus contextos veio à tona com a crise energética internacional da década de 1970 (“crise do petróleo”).

Com relação aos edifícios de escritórios, o histórico dessa tipologia evidencia a relação intrínseca com os edifícios altos ou “torres” ou “skyscrapers” (Gonçalves, 2003). Além da possibilidade de adensamento vertical, concentrando pessoas e recursos em um único terreno, essa tipologia arquitetônica mostra-se carregada de idealismo e simbolismo, podendo ser considerada como a “materialização do poder de sistemas corporativos, globais e internacionais” (Wells, 2005, p.18). O desenvolvimento de tecnologias de construção e sistemas desde o final do século XIX, como o *steel frame*, o elevador elétrico, o telefone e as fachadas do tipo cortina-de-vidro (sem função estrutural) possibilitou a construção, no século XX, de edifícios mais leves e gradativamente mais altos. O processo de extrusão e anodização do alumínio, após a segunda guerra mundial, deu nova expressão ao envelope do edifício; a ampla adoção de sistemas de condicionamento ambiental contribuiu para que as plantas ficassem mais profundas; os serviços e a circulação foram sendo agrupados na parte central (Wells, 2005).

Com plantas crescendo em profundidade, usuários se distanciando das fachadas, o aumento da poluição do ar e do ruído nos centros urbanos e fachadas hermeticamente fechadas, constituiu-se uma situação de (quase) “dependência” de sistemas prediais de condicionamento ambiental nos escritórios, com consequências diretas no consumo energético dos edifícios. Essa composição resultou na tipologia arquitetônica informalmente chamada de “caixa de vidro selada”, a qual se convencionou adotar para edifícios de escritórios em escala global, independentemente dos contextos climáticos e arquitetônicos locais.

Como colocado por Mulfarth (2003),

*Diante de um cenário de degradação ambiental global, escassez de matéria prima, água, energia, aumento da poluição, crise social e econômica, (...) todas estas variáveis trazem novos elementos à Arquitetura aumentando a sua complexidade e fazendo com que haja necessidade de adaptação.*  
(Mulfarth, 2003, p. viii)

A necessidade de promover ações para redução do impacto ambiental e do consumo energético dos edifícios impulsionou a criação de normas e regulamentações técnicas em países europeus (Gauzin-Müller, 2002; Leão et al., 2008).

A expressão “green building” passou a ser amplamente empregada para designar iniciativas que incorporem preocupações com o impacto ambiental e o desempenho energético das edificações – ou iniciativas que argumentam tais feitos (Silva, 2003).

Com a tarefa de se produzir edifícios energeticamente e ambientalmente aprimorados veio a tona a necessidade de quantificar e avaliar os níveis de eficiência: *Qual o desempenho necessário para um edifício ser considerado ambiental e energeticamente eficiente? E como mensurar?* Essa demanda levou ao desenvolvimento de ferramentas para avaliação do desempenho ambiental dos edifícios na década de 1990, as chamadas Certificações de “Edifícios Verdes” ou “Green Buildings” (Silva, 2003).

Diante desse contexto, Arons & Glicksman (2000) e Buchanan (apud Gonçalves, 2003)<sup>10</sup> apontam o surgimento de uma nova geração de edifícios<sup>11</sup> principalmente em

[10] BUCHANAN, Peter. *Skyscrapers and Sustainability*. London, 2002. (acervo do autor). Texto para publicação em *World Architecture*, em 2002.

[11] Ambos os autores se referem a edifícios de porte médio a alto que, de modo geral, abrigam atividades de escritórios.

[12] Fachadas do tipo “double-skin” podem ser caracterizadas pela existência de ao menos duas camadas de vidro configurando uma cavidade, ventilada ou não, que podem ser reguladas, adaptando-se para responder às condições internas aceitáveis de conforto, de um modo energeticamente mais eficiente. No entanto, o termo “double-skin” é geralmente utilizado quando a cavidade gerada pelos panos de vidro é ventilada, razão pela qual é comum referir-se a tais sistemas como fachadas duplas ventiladas (Marcondes, 2004).

[13] No âmbito científico nacional, mencionam-se as pesquisas desenvolvidas por Mulfarth (2003), Vosgueritchian (2006) e Csillag (2007) sobre a sustentabilidade na arquitetura. Dentre os trabalhos desenvolvidos especificamente com foco nos edifícios altos e/ou edifícios de escritórios brasileiros, citam-se: Lamberts (1997, 2005) e Romero (1997, 1999, 2000, 2005) abrangendo a eficiência energética; Silva (2003) enfocando a sustentabilidade dos edifícios; e Gonçalves (2003), Marcondes (2004) e Umakoshi (2008) a respeito da sustentabilidade e do desempenho ambiental dos edifícios e do conforto ambiental de seus usuários; entre outros.

países Europeus, no período entre o final da década de 1990 e o início dos anos 2000. Abrangendo exemplos recém construídos e em fase de projeto ou estudo, os edifícios dessa nova geração são tidos como ambientalmente conscientes, energeticamente eficientes e apresentam uma arquitetura inovadora, com modelos de edifícios esteticamente “elegantes” (Arons & Glicksman, 2000).

Aspectos comuns aos edifícios dessa nova geração e ideais a serem atingidos por eles incluem: o uso de energia de fontes renováveis; o uso de materiais recicláveis; ser suficientemente flexíveis e adaptáveis a alterações de usos; o aproveitamento dos recursos naturais para o condicionamento ambiental durante o maior período possível ao longo do ano, especialmente com relação à iluminação natural e à ventilação natural; conformar plantas estreitas (com distância máxima da fachada ao redor de 7m) e pé direito livre interno “generoso”; para os períodos em que a ventilação natural não for possível, utilizar sistemas de baixo consumo energético em substituição a sistemas de condicionamento do ar convencionais – constituindo uma estratégia de condicionamento ambiental em modo-misto; e produzirem toda ou parte da sua demanda de energia, a partir de fontes limpas, como o uso de células fotovoltaicas (Buchanan, 2003). Para cumprir parte dos ideais de eficiência energética e viabilizar a incorporação dos recursos naturais de iluminação e ventilação, atenção é voltada às fachadas desses edifícios. Os autores indicam a adoção generalizada de *double-skin façades* ou fachadas duplas ventiladas<sup>12</sup>, como parte das experimentações e inovações inerentes aos edifícios dessa nova geração.

Atualmente, a questão da sustentabilidade e da eficiência energética dos edifícios faz parte de uma discussão vigente em todo o mundo – em diferentes níveis, seguindo as particularidades socioeconômicas, culturais e arquitetônicas de cada contexto. Inclusive no Brasil, aonde o tema vem adquirindo espaço no debate local sobre as questões de arquitetura e urbanismo<sup>13</sup>.

Sob essa óptica, o presente capítulo comenta a arquitetura de alguns exemplos de edifícios de escritórios identificados em diferentes países por argumentar a inclusão de questões ambientais, energéticas e de sustentabilidade em seus projetos, para os contextos nos quais estão inseridos. Pode-se dizer que tais edificações são ícones, não correspondendo à produção massiva de edifícios de escritórios nas respectivas localidades. Tem-se como objetivo investigar a incorporação da ventilação natural nos edifícios de escritórios e identificar características arquitetônicas adotadas para o aprimoramento de seu desempenho térmico.

Para tanto, o conceito de conforto térmico e seus requisitos para usuários de edifícios sob atividade de escritórios é discutido, tendo em vista os condicionantes do espaço interno e sua relação com o clima externo. Adicionalmente, é realizada uma análise e diagnóstico das condições climáticas das principais cidades de implantação dos edifícios comentados, fazendo um contraponto entre elas, com destaque para suas principais características e requisitos de projeto para obtenção de conforto térmico no interior dos ambientes.

Abordando o panorama internacional a partir do final da década de 1990, ênfase foi dada aos edifícios que possibilitam a ventilação natural do ambiente interno por partes do ano.

Em edifícios com ventilação natural, o condicionamento natural pode acontecer por todo o tempo ou por partes do ano, configurando a estratégia de modo-misto. O condicionamento ambiental em modo-misto, ou *mixed-mode*<sup>14</sup>, é composto por uma estratégia de ventilação híbrida, a qual alia períodos de condicionamento natural e artificial para um mesmo ambiente, sendo que o sistema de condicionamento artificial só é ligado quando as condições climáticas ou outros fatores externos e/ou internos impeçam a obtenção de conforto nos ambientes por meios naturais. O sistema artificial utilizado nesse caso pode ser um sistema de condicionamento de ar ou ventilação

mecânica.

Já com relação ao contexto brasileiro, foco foi dado aos edifícios de escritórios na cidade de São Paulo após 2005, tendo em vista que a discussão local sobre o desempenho ambiental e energético das edificações vem ganhando amplitude recentemente. Com essa premissa, apresentaram-se os edifícios dos quais se obteve a maior quantidade de informações, ou que se julgou mais relevantes para os objetivos dessa investigação.

A arquitetura dos exemplos de edifícios de escritórios selecionados é comentada com base no projeto arquitetônico e no modelo de edifício, tendo em vista sua adequação ao contexto climático local, além dos aspectos vinculados ao consumo energético, abrangendo os sistemas e estratégias de condicionamento ambiental, com destaque para as soluções passivas.

## 1.1. Conforto térmico e condições climáticas

### 1.1.1. O Conforto Térmico

O termo “conforto” é frequentemente utilizado para se referir ao “conforto térmico”, e não ao “conforto humano”, no sentido verdadeiro da palavra. Com relação ao conforto térmico, uma série de definições é encontrada, podendo-se citar:

*(...) that condition of mind which expresses satisfaction with the thermal environment (aquele estado de espírito que expressa satisfação com o ambiente térmico)<sup>15</sup>, ASHRAE 55 (2004), p.2*

O conforto envolve tanto fatores fisiológicos – objetivos, quanto psicológicos - menos tangíveis, variando de pessoa para pessoa, o que imprime dificuldade para se avaliar o conforto numericamente.

No âmbito da arquitetura, pode-se dizer que o conforto é subjetivo, e está intimamente relacionado às sensações provocadas em cada usuário (ou grupo de usuários), como consequência de estímulos do ambiente. Para obtenção de conforto em um determinado edifício, devem ser atendidas exigências humanas e funcionais, vinculadas ao tipo de edificação e à atividade desenvolvida. Assim, a arquitetura pode ser considerada como a síntese entre os estímulos físicos propiciados pelo meio ambiente, a construção e o usuário, objetivando atender suas exigências humanas e funcionais.

O conforto térmico depende do balanço entre parâmetros comportamentais e físicos. Os parâmetros comportamentais estão relacionados ao indivíduo, como metabolismo e vestimenta. Já os parâmetros físicos, estão relacionados ao meio ambiente, a dizer: temperatura do ar, temperatura das superfícies (temperatura radiante), umidade relativa e velocidade do ar.

Desse modo, o estabelecimento de condições desejáveis de conforto deve levar em consideração o local de implantação do edifício (condições climáticas), o uso do espaço (atividade a ser desenvolvida), e a tipologia das edificações, verificando seus requisitos específicos, humanos e funcionais. No âmbito do presente trabalho, serão abordados os edifícios de escritórios médios a altos (isto é, com mais de cinco pavimentos), localizados em determinadas cidades do mundo, com destaque para a cidade de São Paulo.

A respeito do projeto de edifícios, o CIBSE GUIDE A (1986)<sup>16</sup> afirma que, se os indivíduos têm a facilidade de alterar o ambiente nos quais estão inseridos, eles tendem a usar tal artifício para aprimorar o conforto. Nesse sentido, o grau de controle e adaptabilidade do ambiente interno também influencia na percepção de conforto, como constatado por Brager & Dear (1998, 2000, 2002), Fanger & Toftum (2002), Nicol & Humphreys (2002),

[14] De acordo com a definição do CIBSE Applications Manual AM13 (2000), “Mixed mode is a term used to describe servicing strategies that combine natural ventilation with mechanical ventilation and/or cooling in the most effective manner. It involves maximising the use of the building fabric and envelope to achieve indoor environmental conditions, and then supplementing this with degrees of mechanical systems, in all or parts of the building” (O modo misto é um termo usado para descrever as estratégias de condicionamento que combinam a ventilação natural à ventilação mecânica e/ou refrigeração na maneira mais eficaz. Envolve maximizar o uso das superfícies de revestimento e do envelope do edifício para conseguir certas condições ambientais internas, e então suplementá-las esporadicamente com sistemas mecânicos, em todo ou em partes do edifício), tradução livre da autora. (CIBSE AM13, 2000, p.1)

[15] Tradução livre da autora

[16] Trata-se de um manual de recomendações técnicas para o projeto e a construção de edifícios ingleses, cujos parâmetros atuam, com frequência, no embasamento das normas e regulamentações energéticas do país.

[17] Os escritórios “formais” e “informais” diferem quanto ao vestuário dos usuários, considerando-se a escritórios formais (BRE, 1994).

[18] O DIN 4108 (2003) é um regulamento de edificações nacional o qual define requisitos mínimos para o projeto de edifícios na Alemanha (Pfapperott et al., 2007).

e sendo alvo de estudos recentes (Wagner et al., 2007; Barlow & Fiala, 2007; Rijal et al., 2007). Esse aspecto é especialmente relevante para a presente discussão sobre edifícios de escritórios com ventilação natural e desempenho térmico aprimorado.

### 1.1.1.1. Parâmetros de conforto térmico para edifícios de escritórios

A especificação de condições aceitáveis de conforto térmico para o ambiente interno geralmente aparece vinculada ao estabelecimento de valores limites ou faixas de temperatura do ar e umidade relativa do ar, tendo vista as relações intrínsecas entre o indivíduo e o ambiente ao seu redor.

No Brasil, não há legislação específica referente a temperaturas desejáveis ou aceitáveis para o interior dos edifícios. Para ambientes artificialmente condicionados, utilizam-se a norma NBR 16401 (2008) - *Instalações Centrais de Sistema de condicionamento de ar para Conforto: Parâmetros Básicos de Projeto*; e a Orientação Técnica da Agência Nacional de Vigilância Sanitária, ANVISA (2003) - *Orientação Técnica sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior, em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo*.

Com base na NBR 16401 (2008), para a situação de verão são recomendadas faixas de temperatura do ar entre 23°C e 26°C, umidades relativas entre 40% e 65%, e velocidades do ar a uma altura de 1,5m de 0,025m/s a 0,25 m/s.

Internacionalmente são encontradas normas e regulamentações para o conforto térmico de usuários de edifícios de escritórios, inclusive alguns específicos para ambientes naturalmente ventilados. Os critérios utilizados nessas normas aparecem em diferentes formatos. A título de exemplo, o BRE (1994) estabelece uma temperatura média interna para o período ocupado e um desvio máximo dessa média, sendo 22 ±1°C para escritórios artificialmente climatizados, 23 ±2°C para escritórios formais naturalmente ventilados e 25 ±2°C para escritórios informais naturalmente ventilados (BRE, 1994)<sup>17</sup>. Já o standard alemão DIN 4108 (2003)<sup>18</sup> propõe a definição de um número de horas de excedência a um limite de temperatura do ar determinado para o ambiente interno de edifícios naturalmente ventilados (independentemente da atividade) (Pfapperott et al., 2007).

As referências mais utilizadas são as normas ISO 7730 (1994) - *Moderate thermal environments: determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort*, ISO 7730 (2005) - *Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria* e ASHRAE 55 (1992) - *Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy*.

Ambas foram baseadas em resultados de experimentos laboratoriais, com objetivo original de fornecer diretrizes a edifícios artificialmente condicionados, nos quais as condições térmicas são estáticas (Wagner et al., 2007). As normas em questão apresentam um procedimento de estimativa do voto médio dos usuários (PMV) e da porcentagem de pessoas insatisfeitas (PPD) com relação ao conforto térmico em um dado ambiente, considerando variáveis pessoais (atividade e vestimenta) e ambientais (temperatura, umidade relativa e velocidade do ar, e temperatura radiante média).

A aplicação das normas ASHRAE 55 (1992) e ISO 7730 (1994, 2005) adota limites rígidos de condições térmicas nos ambientes, já que esses estariam controlados por sistemas de condicionamento ambiental. Segundo Brager & Dear (2002), as condições térmicas estipuladas pelas normas em questão foram consideradas universalmente aplicáveis a toda e qualquer tipologia de edifício, contexto climático e população – o que pode ser constatado, na prática, com a ampla adoção dessas normas para edifícios em diferentes países.

Estudos de campo realizados por Brager & Dear (1998) compreendendo 21.000 votos de usuários primordialmente em edifícios de escritórios, indicaram diferenças na resposta dos ocupantes de ambientes naturalmente ventilados e artificialmente condicionados, principalmente devido ao histórico térmico do edifício (diferença de experiência térmica), à mudança na vestimenta e a percepção de diferentes níveis de controle e intervenção nas condições internas, resultando em alteração das expectativas dos ocupantes. Verificou-se um aumento na tolerância dos usuários de edifícios naturalmente ventilados com relação à variação nas condições ambientais, inclusive com aceitação de temperaturas do ar mais elevadas (Wagner et al., 2007).

Com base no trabalho de Brager & Dear (1998), a norma ASHRAE 55 (2004) propõe um modelo adaptativo de conforto no qual as condições internas aceitáveis são vinculadas às condições climáticas externas, conforme a definição:

*(...) a model that relates indoor design temperatures or acceptable temperature ranges to outdoor meteorological or climatological parameters. (um modelo que relaciona temperaturas internas de projeto ou faixas aceitáveis de parâmetros climatológicos ou meteorológicos) ASHRAE 55 (2004), p.2*

De modo análogo à norma ISO 7730 (2005), o objetivo da ASHRAE 55 (2004) é especificar combinações de fatores térmicos do ambiente interno (temperatura do ar e temperatura radiante média, umidade relativa e velocidade do ar) e fatores pessoais (atividade e vestimenta) que proporcionarão condições térmicas aceitáveis para uma parcela majoritária dos ocupantes do ambiente.

A ASHRAE 55 (2004) apresenta um método específico para aplicação em edifícios naturalmente ventilados. Esse método considera ausência de sistema de condicionamento ativo, atividade física dos usuários próxima do sedentário (com taxas metabólicas entre 1,0 met e 1,3 met) e aplica-se a ambientes nos quais os usuários possam exercer controle sobre algumas variáveis do espaço, podendo adaptar-se a variações climáticas internas e externas, principalmente por meio do controle de abertura de janelas e da troca de vestimentas. Sendo assim, não é necessário especificar valores relativos às vestimentas (clo), e não são impostos limites de umidade ou velocidade do ar. Segundo a ASHRAE 55(2004), o método proposto é válido apenas para localidades com temperaturas médias mensais entre 10°C e 33,5°C.

No método em questão, faixas de temperatura operativa aceitáveis são definidas para o ambiente interno. A temperatura operativa ( $T_o$ ) é a temperatura uniforme de um ambiente hipotético com uma envoltória negra imaginária no qual um ocupante apresentaria a troca térmica radiante e convectiva que ele apresenta no ambiente não uniforme real. Numericamente, é a média entre a temperatura de bulbo seco do ar (TBS) e a temperatura radiante média (TRM), ponderada pelos respectivos coeficientes de troca térmica (hc e hr), como ilustra a equação:

$$T_o = \frac{(hr * TRM) + (hc * TBS)}{(hr + hc)} \quad \text{eq1-1}$$

onde:

**$T_o$**  é a temperatura operativa do ambiente (°C)

**hr** é o coeficiente de trocas térmicas por radiação ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )

**TRM** é a temperatura radiante média do ambiente (°C)

**hc** é o coeficiente de trocas térmicas por convecção ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )

De acordo com a ASHRAE 55 (2004), os limites de temperatura operativa aceitáveis variam conforme a média das temperaturas externas de cada mês, e podem ser determinados de acordo com a Figura 5 para duas faixas: uma para 80% de usuários satisfeitos (isto é, para o máximo de 20% de usuários insatisfeitos) de aplicação geral, e outra para 90% usuários satisfeitos (isto é, para o máximo de 10% de usuários insatisfeitos), recomendada para situações que requerem um maior rigor na avaliação das condições de conforto.

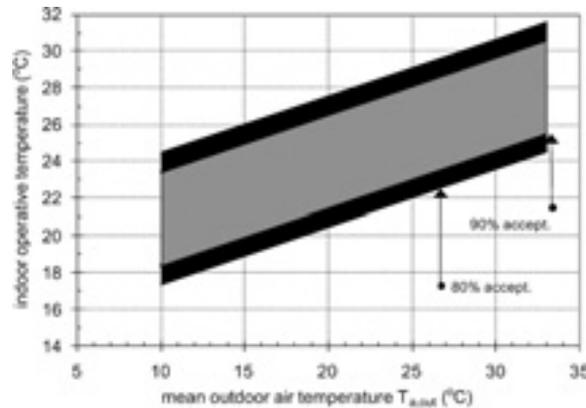


Figura 5. Faixas de temperatura operativa aceitáveis para ambientes naturalmente condicionados de acordo com a temperatura média mensal e a porcentagem de ocupantes insatisfeitos, proposta pela norma ASHRAE 55 (2004)

A partir da ASHRAE 55 (2004) é verificado um maior interesse a respeito de modelos adaptativos de conforto, com o desenvolvimento de diversos estudos sobre o tema. Os estudos de campo que vem sendo realizados com usuários de edifícios de escritórios naturalmente ventilados indicam que quanto maior o nível de controle das condições internas e a possibilidade de intervenção no ambiente, maior é a satisfação dos usuários, com redução dos votos de desconforto térmico.

Os resultados de dois desses estudos, realizados em dezessete edifícios de escritórios naturalmente ventilados na Alemanha, são apresentados em Wagner et al. (2007). Segundo o autor, os resultados obtidos mostraram que os votos dos usuários não corresponderam aos votos calculados com métodos de PMV ou PPD, entretanto, uma boa correlação foi encontrada com modelos de conforto adaptativo. Com base nos estudos, o autor confirma, ainda, a relação de dependência entre as condições de conforto térmico e a temperatura externa em edifícios naturalmente ventilados; e que a possibilidade de controle das condições climáticas internas pelos ocupantes, e acima disso, que a percepção do efeito gerado por essa intervenção, exercem significativa influência na satisfação com as condições térmicas do ambiente.

### 1.1.2. Condições Climáticas

Buscando um melhor entendimento do desempenho ambiental de exemplos de edifícios de escritórios projetados e construídos em 10 cidades do mundo, faz-se necessário conhecer o contexto climático em que estão localizados.

A partir da análise das variáveis climáticas (temperatura do ar, umidade, ventos, radiação solar, etc) é possível identificar requisitos para o conforto dos usuários, e apontar estratégias de projeto para o edifício, visando, assim, um aprimoramento de seu desempenho.

Uma breve análise das condições climáticas das cidades nas quais estão inseridos os principais edifícios a serem comentados neste capítulo é apresentada a seguir, compreendendo quatro das principais variáveis a influenciar o conforto térmico do usuário no ambiente interno: a temperatura e a umidade do ar, a radiação solar e os ventos (Frota & Schiffer, 1995). Primeiramente um diagnóstico climático é realizado a partir de dados de temperatura e umidade relativa do ar. Adicionalmente, comentários

são realizados a respeito dos ventos, da incidência de radiação solar, e da disponibilidade de luz natural nos diferentes contextos, tendo em vista sua relevância para o conforto em, e o desempenho ambiental dos edifícios com atividade de escritórios, naturalmente ventilados, abordados nesta pesquisa.

Com caráter genérico, essa análise objetiva verificar as semelhanças e as distinções entre os diferentes contextos, identificando os principais desafios para a arquitetura de edifícios em tais condições climáticas, sem considerar as mudanças climáticas globais atuais<sup>19</sup>.

As cidades cujas condições climáticas foram analisadas são: Nova York (USA), Frankfurt, Berlin e Bonn (Alemanha), Londres (Inglaterra), Melbourne e Sydney (Austrália), Tokyo (Japão), Rio de Janeiro e São Paulo (Brasil).

A base de dados utilizada para cada cidade é originária de fontes distintas. Com relação à cidade de São Paulo, utilizou-se banco de dados climáticos elaborado por Benedetto (2007)<sup>20</sup>. Para a cidade do Rio de Janeiro, foram extraídos dados do software Climaticus versão 4.2 (Alucci, 2005)<sup>21</sup>. Para a cidade de Nova York, utilizou-se base TMY3 com dados provenientes do “Climate Design Data 2005 ASHRAE Handbook”<sup>22</sup>. A respeito das demais cidades, foi utilizado banco de dados do “International Weather for Energy Calculations” (IWECC)<sup>23</sup>.

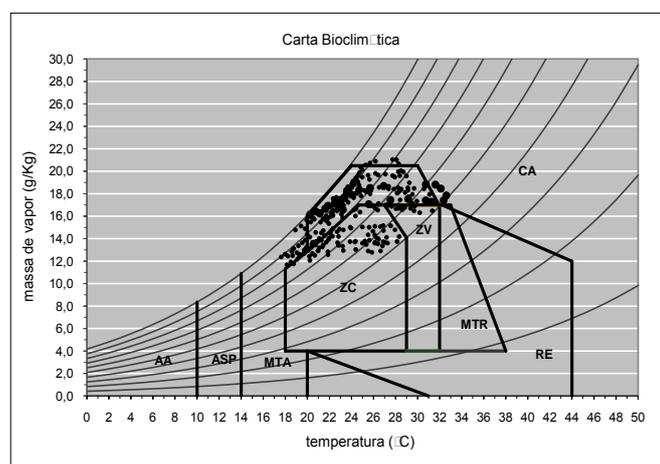
### 1.1.2.1. Diagnósticos climáticos

Diagnósticos climáticos foram elaborados para cada cidade a partir de dados de temperatura e umidade relativa do ar, referentes a 8.760 horas de um ano. Nos diagnósticos, a combinação e a análise desses dados horários permitem detectar demandas e requisitos ambientais para a arquitetura de edifícios em tais condições, e recomendar estratégias de Com exceção das cidades de São Paulo e de Nova York, cuja base de dados climáticos inclui dados medidos até o ano de 2005, os dados utilizados para as demais cidades referem-se a períodos entre 1961 e 1990, anteriores ao registro da ocorrência de fenômenos como “El niño” e “La niña”, por exemplo.

A montagem do balanço horário requer o uso de uma carta psicrométrica com a identificação de zonas bioclimáticas, incluindo a delimitação de uma zona de conforto térmico. A zona de conforto térmico corresponde a uma região de variação da temperatura e da umidade do ar, na qual a maioria dos usuários se sente bem (Corbella & Yannas, 2003)<sup>24</sup>. Utilizou-se a carta bioclimática apresentada no software Climaticus 4.2 (Alucci 2005, apud Givoni), definida para atividade sedentária, como ilustrado na Figura 6<sup>25</sup> para a cidade de São Paulo.

As Figuras 7 a 16 trazem os diagnósticos climáticos das dez cidades analisadas.

Figura 6. Carta psicrométrica com dados de temperatura e umidade relativa do ar da cidade de São Paulo (Fonte: Climaticus; Alluci 2005, apud Givoni)



[19] Com exceção das cidades de São Paulo e de Nova York, cuja base de dados climáticos inclui dados medidos até o ano de 2005, os dados utilizados para as demais cidades referem-se a períodos entre 1961 e 1990, anteriores ao registro da ocorrência de fenômenos como “El niño” e “La niña”, por exemplo.

[20] O banco de dados climáticos de Benedetto (2006) para a cidade de São Paulo contém dados médios horários de um ano de referência, elaborado a partir de dados climáticos de medições de um período recente compreendendo os anos de 2003, 2004 e 2005. Este é apresentado no item 4.1.2 do Capítulo 4.

[21] Os dados climáticos da cidade do Rio de Janeiro disponíveis no software Climaticus são provenientes de medições de um período de 30 anos. Fonte: Normais Climatológicas (1961 - 1990), Departamento Nacional de Meteorologia, Secretaria Nacional de Irrigação, Ministério da Agricultura e Reforma Agrária. Brasília, 1992.

[22] O arquivo TMY3 utilizado apresenta dados de um “ano típico”, formado a partir de dados climáticos de medições no período de 1991 a 2005 (ASHRAE, 2005).

[23] A base do IWECC apresenta dados de um “ano típico”, elaborado a partir de dados climáticos horários medidos num período de até 19 anos (ASHRAE, 2001).

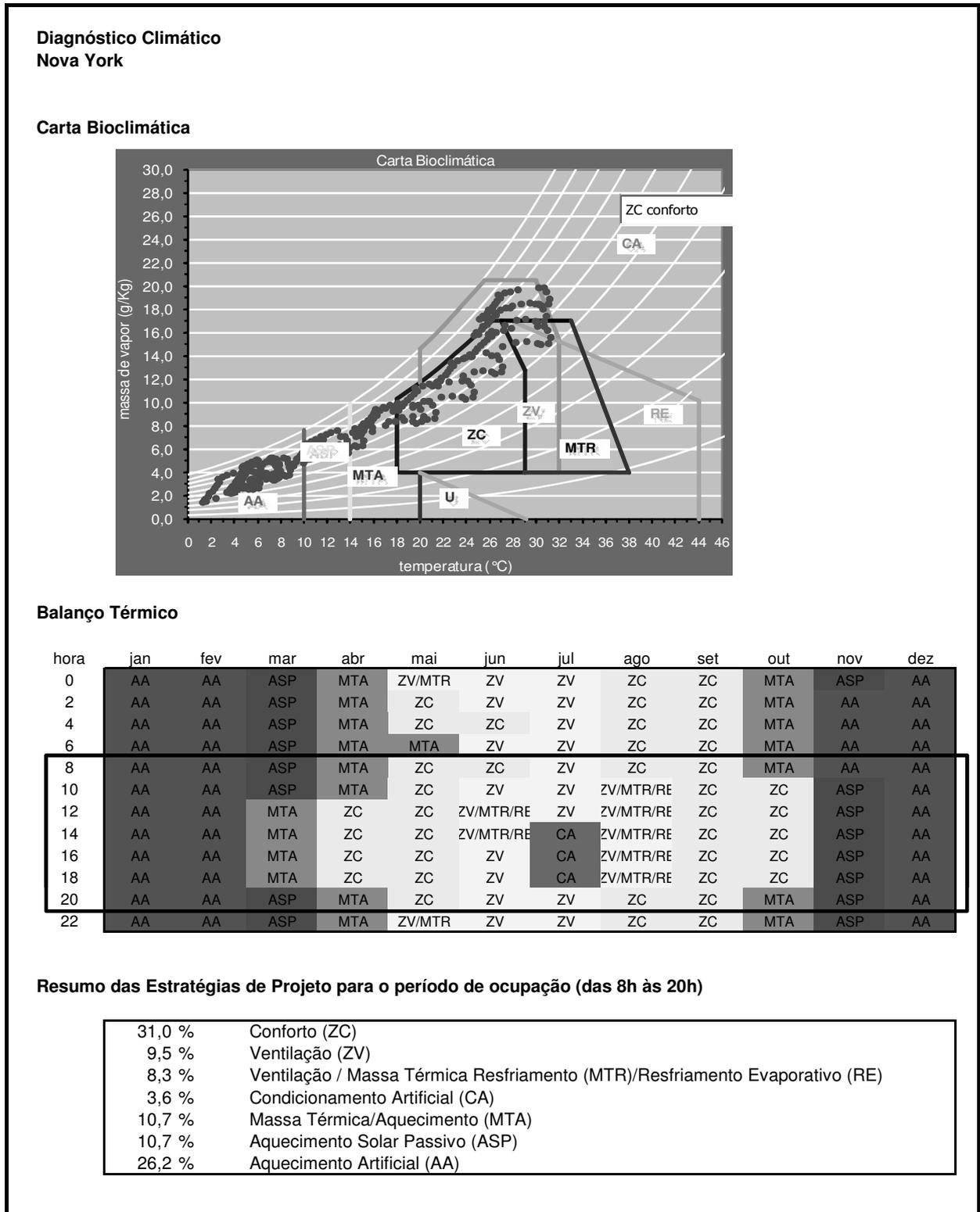
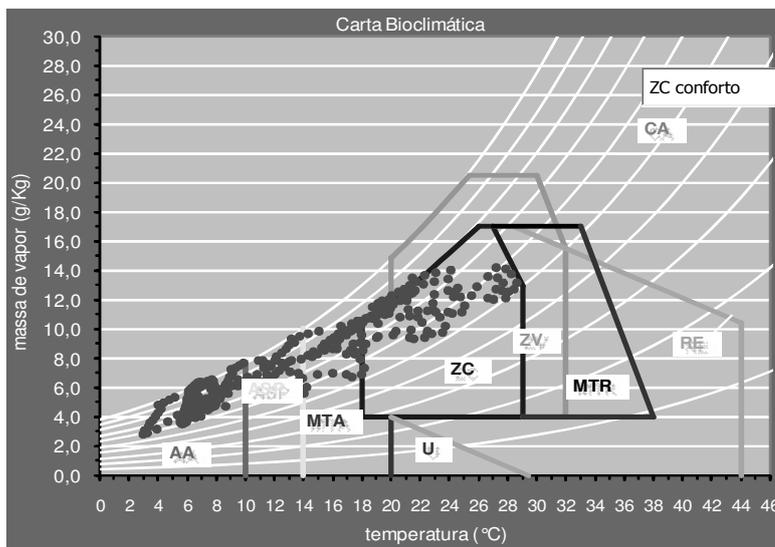


Figura 7. Diagnóstico climático da cidade de Nova York (US)

**Diagnóstico Climático  
Frankfurt Am Main**

**Carta Bioclimática**



**Balanco Térmico**

hora	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
0	AA	AA	AA	ASP	MTA	ZC	ZC	ZC	MTA	ASP	AA	AA
2	AA	AA	AA	ASP	MTA	ZV/MTR	ZC	ZC	MTA	ASP	AA	AA
4	AA	AA	AA	ASP	MTA	ZV/MTR	ZV/MTR	MTA	MTA	ASP	AA	AA
6	AA	AA	AA	ASP	MTA	MTA	ZV/MTR	MTA	MTA	ASP	AA	AA
8	AA	AA	AA	ASP	MTA	ZC	ZC	ZC	MTA	ASP	AA	AA
10	AA	AA	ASP	MTA	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	MTA	ASP	AA
12	AA	AA	ASP	MTA	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	MTA	ASP	AA
14	AA	AA	MTA	MTA	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	ASP	AA
16	AA	AA	ASP	MTA	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	MTA	ASP	AA
18	AA	AA	ASP	MTA	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	MTA	ASP	AA
20	AA	AA	ASP	ASP	ZV/MTR	ZC	ZC	ZC	MTA	MTA	AA	AA
22	AA	AA	AA	ASP	MTA	MTA	ZC	ZV	MTA	ASP	AA	AA

**Resumo das Estratégias de Projeto para o período de ocupação (das 8h às 20h)**

38,1 %	Conforto (ZC)
1,2 %	Ventilação (ZV) / Massa Térmica Resfriamento (MTR)
16,7 %	Massa Térmica/Aquecimento (MTA)
15,5 %	Aquecimento Solar Passivo (ASP)
28,6 %	Aquecimento Artificial (AA)

Figura 8. Diagnóstico climático da cidade de Frankfurt Am Main (ALE)

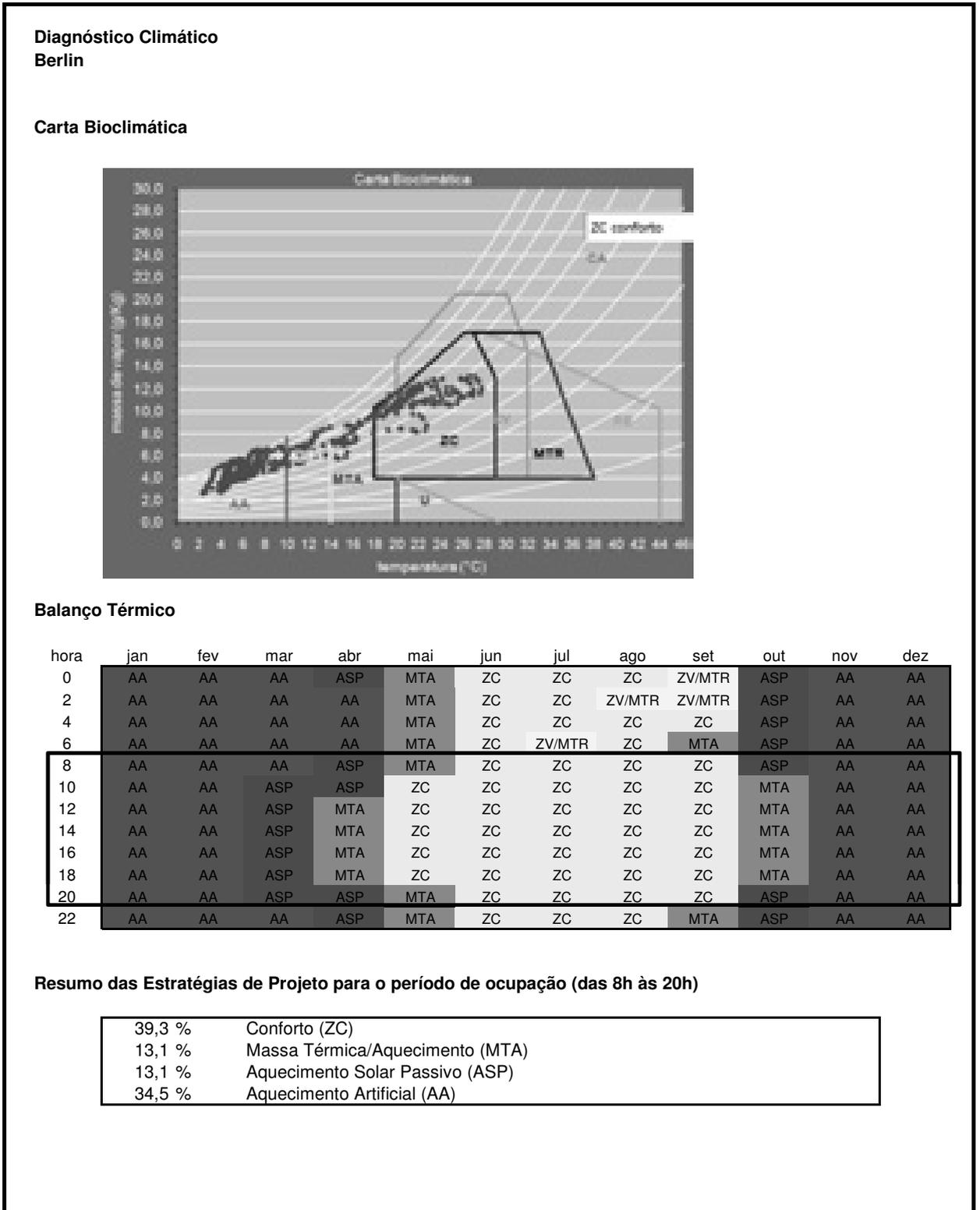
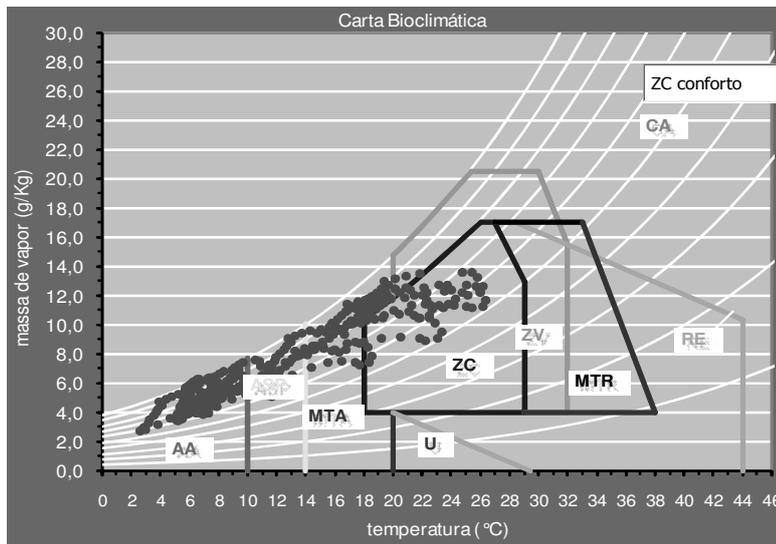


Figura 9. Diagnóstico climático da cidade de Berlin (ALE)

**Diagnóstico Climático  
Bonn (Colônia)**

**Carta Bioclimática**



**Balanco Térmico**

hora	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
0	AA	AA	AA	ASP	MTA	MTA	ZV/MTR	MTA	MTA	ASP	AA	AA
2	AA	AA	AA	ASP	MTA	MTA	ZV/MTR	MTA	MTA	ASP	AA	AA
4	AA	AA	AA	ASP	MTA	MTA	MTA	MTA	MTA	ASP	AA	AA
6	AA	AA	AA	ASP	ASP	MTA	MTA	MTA	MTA	ASP	AA	AA
8	AA	AA	AA	ASP	MTA	ZV/MTR	ZV/MTR	MTA	MTA	ASP	AA	AA
10	AA	AA	AA	MTA	ZC	ZC	ZC	ZC	ZV/MTR	MTA	AA	AA
12	AA	AA	ASP	MTA	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	MTA	ASP	AA
14	AA	AA	ASP	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	MTA	ASP	AA
16	AA	AA	ASP	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	MTA	ASP	AA
18	AA	AA	ASP	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	MTA	ASP	AA
20	AA	AA	AA	MTA	MTA	ZV	ZC	ZV	MTA	ASP	AA	AA
22	AA	AA	AA	ASP	MTA	MTA	MTA	MTA	MTA	ASP	AA	AA

**Resumo das Estratégias de Projeto para o período de ocupação (das 8h às 20h)**

33,3 %	Conforto (ZC)
2,4 %	Ventilação (ZV)
3,6 %	Ventilação (ZV) / Massa Térmica Resfriamento (MTR)
15,5 %	Massa Térmica/Aquecimento (MTA)
13,0 %	Aquecimento Solar Passivo (ASP)
32,0 %	Aquecimento Artificial (AA)

Figura 10. Diagnóstico climático da cidade de Bonn (ALE)

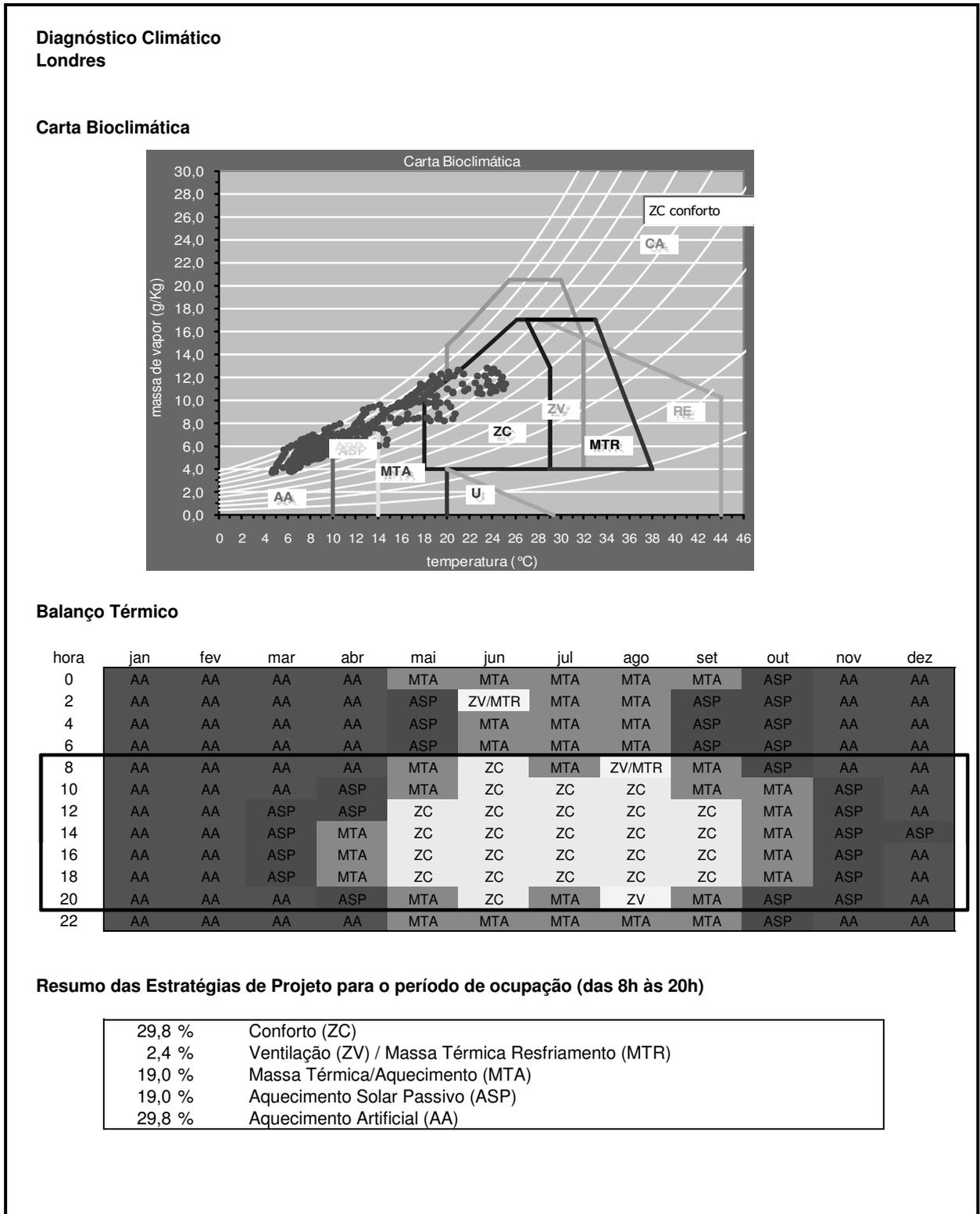
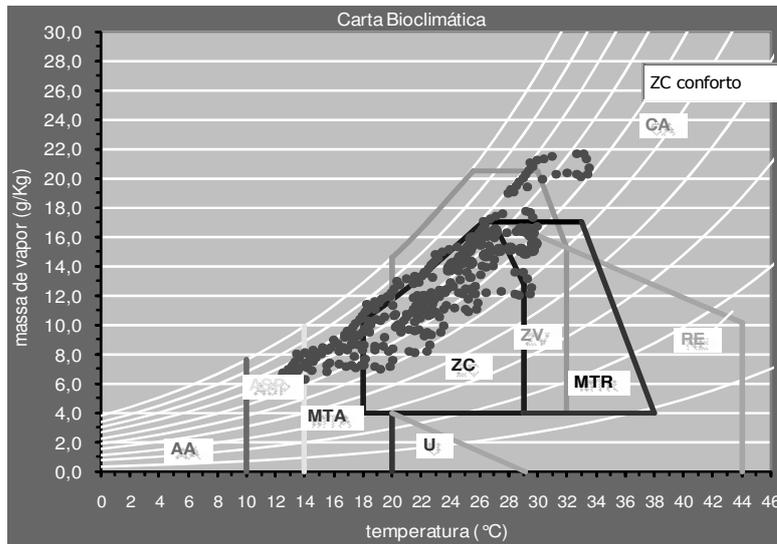


Figura 11. Diagnóstico climático da cidade de Londres (ING)

**Diagnóstico Climático  
Sydney**

**Carta Bioclimática**



**Balanco Térmico**

hora	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
0	ZC	ZC	ZV	ZV	MTA	ASP	MTA	MTA	ZC	ZC	ZC	CA
2	ZC	ZC	ZC	MTA	MTA	ASP	ASP	MTA	MTA	ZC	ZC	ZV
4	ZC	ZC	ZC	MTA	MTA	ASP	ASP	MTA	MTA	ZC	ZC	ZV
6	ZC	ZC	ZC	MTA	MTA	ASP	ASP	ASP	MTA	ZC	ZC	ZV
8	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	ASP	MTA	MTA	ZC	ZC	ZC	ZV
10	ZC	ZV/MTR/RE	ZC	ZC	ZC	MTA	MTA	ZC	ZC	ZC	ZC	CA
12	ZV/MTR/RE	ZV/MTR/RE	ZC	ZC	ZC	MTA	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	CA
14	ZV/MTR/RE	ZV/MTR/RE	ZC	ZV/MTR/RE	ZC	CA						
16	ZV/MTR/RE	ZV	ZC	ZC	ZC	MTA	ZC	ZC	ZC	ZV/MTR/RE	ZC	CA
18	ZV/MTR/RE	ZV	ZC	ZC	ZC	MTA	ZC	ZC	ZC	ZV/MTR/RE	ZC	CA
20	ZC	ZV	ZV	ZV	MTA	MTA	MTA	MTA	ZV/MTR	ZC	ZC	CA
22	ZC	ZV	ZV	ZV	MTA	ASP	MTA	MTA	ZC	ZC	ZC	CA

**Resumo das Estratégias de Projeto para o período de ocupação (das 8h às 20h)**

58,3 %	Conforto (ZC)
7,1 %	Ventilação (ZV)
13,1 %	Ventilação /Massa Térmica Resfriamento(MTR)/Resfriamento Evaporativo(RE)
7,1 %	Condicionamento Artificial (CA)
11,9 %	Massa Térmica/Aquecimento (MTA)
1,2 %	Aquecimento Solar Passivo (ASP)

Figura 12. Diagnóstico climático da cidade de Sydney (AUS)

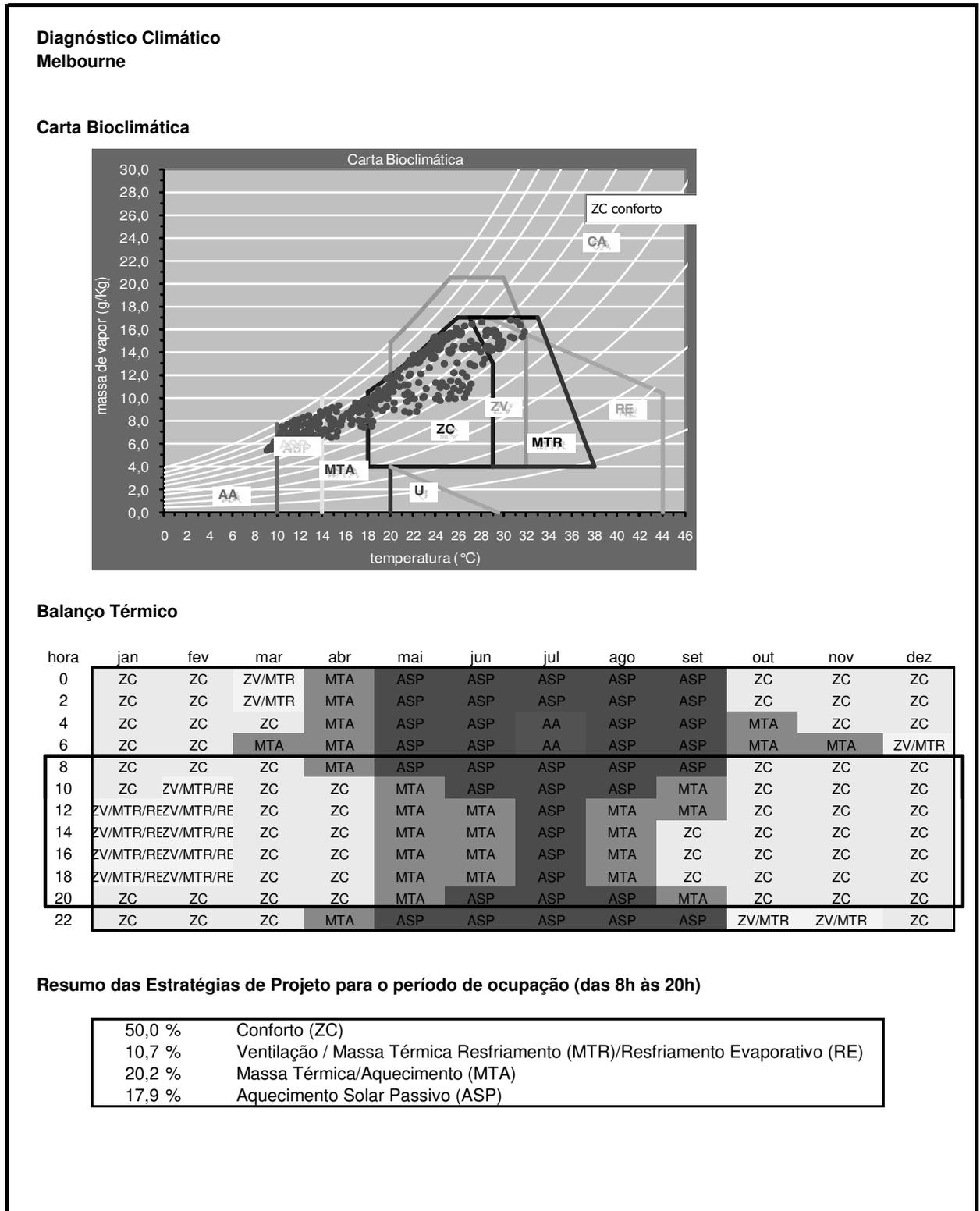
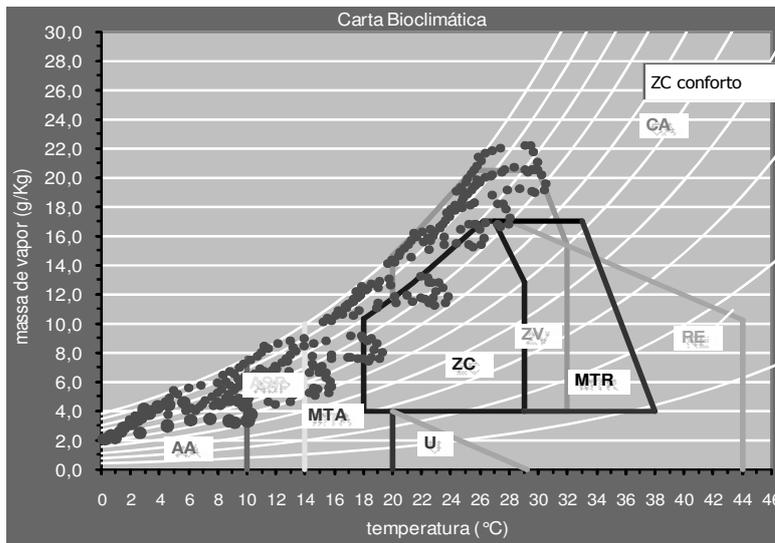


Figura 13. Diagnóstico climático da cidade de Melbourne (AUS)

**Diagnóstico Climático  
Tokyo**

**Carta Bioclimática**



**Balanco Térmico**

hora	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
0	AA	AA	AA	ASP	MTA	ZV	CA	ZV	ZV	MTA	ASP	AA
2	AA	AA	AA	ASP	MTA	ZV	ZV	ZV	ZV	MTA	ASP	AA
4	AA	AA	AA	ASP	MTA	ZV	ZV	ZV	ZV	MTA	AA	AA
6	AA	AA	AA	ASP	MTA	MTA	ZV	ZV	ZV	MTA	AA	AA
8	AA	AA	AA	ASP	MTA	ZV	ZV	ZV	ZV	MTA	ASP	AA
10	AA	ASP	ASP	MTA	ZC	ZV	CA	ZV	ZV	ZC	MTA	AA
12	AA	MTA	MTA	MTA	ZC	ZC	CA	ZV	ZV/MTR	ZC	MTA	ASP
14	AA	MTA	MTA	ZC	ZC	ZC	CA	ZV	ZV/MTR	ZC	ZC	ASP
16	AA	MTA	MTA	ZC	ZC	ZC	CA	CA	ZV	ZC	ZC	ASP
18	AA	MTA	MTA	ZC	ZC	ZC	CA	CA	ZV	ZC	ZC	ASP
20	AA	ASP	ASP	MTA	MTA	ZV	CA	ZV	ZV	MTA	ASP	AA
22	AA	AA	AA	ASP	MTA	ZV	CA	ZV	ZV	MTA	ASP	AA

**Resumo das Estratégias de Projeto para o período de ocupação (das 8h às 20h)**

23,8 %	Conforto (ZC)
16,7 %	Ventilação (ZV)
2,4 %	Ventilação / Massa Térmica Resfriamento (MTR)
9,5 %	Condicionamento Artificial (CA)
20,2 %	Massa Térmica/Aquecimento (MTA)
13,1 %	Aquecimento Solar Passivo (ASP)
14,3 %	Aquecimento Artificial (AA)

Figura 14. Diagnóstico climático da cidade de Tokyo (JAP)

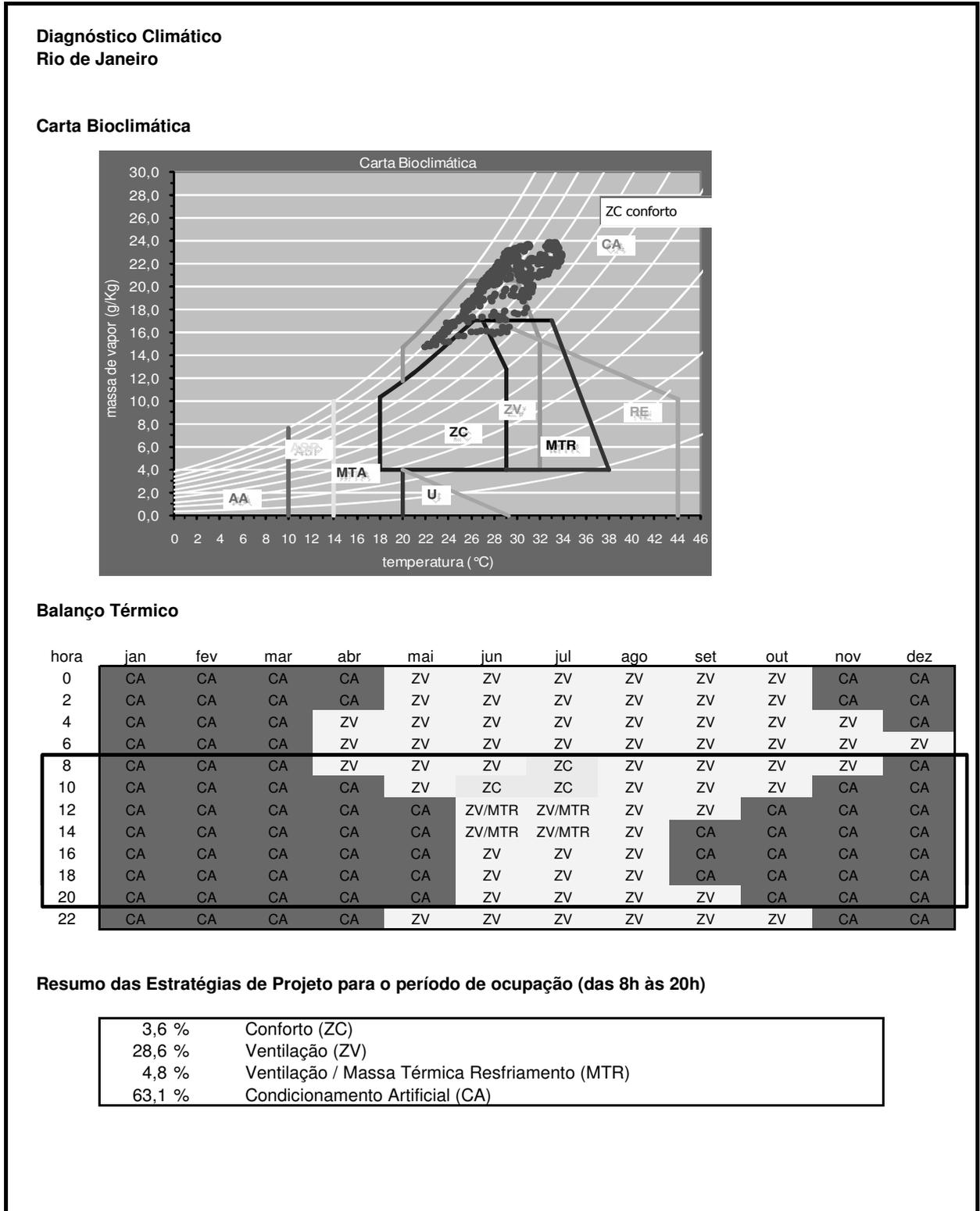
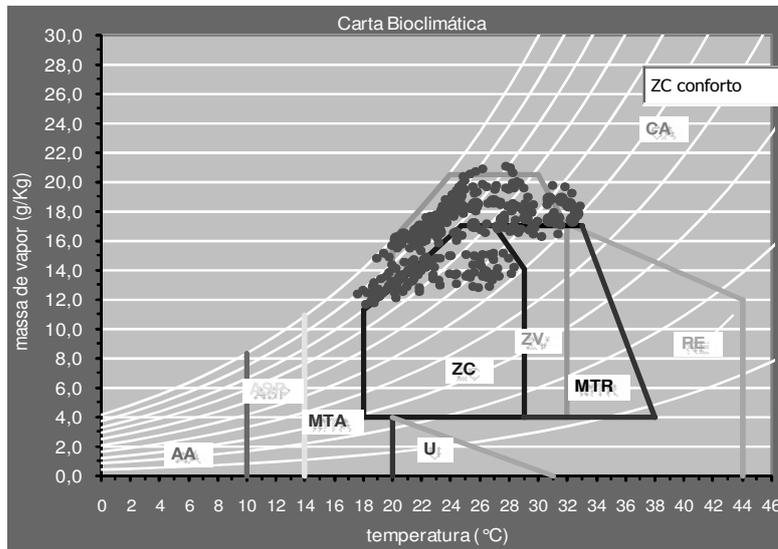


Figura 15. Diagnóstico climático da cidade de Rio de Janeiro (BR)

**Diagnóstico Climático**  
**São Paulo**

**Carta Bioclimática**



**Balanco Térmico**

hora	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
0	ZV	ZV	ZV	ZV	ZC	MTA	ZC	ZV	ZV	ZV	ZV	ZV
2	ZV	ZV	ZV	ZV	ZC	MTA	ZV/MTR	ZV	ZV	ZV	ZV	ZV
4	ZV	ZV	ZV	ZV	ZC	MTA	ZV/MTR	MTA	ZV	ZV	ZV	ZV
6	ZV	ZV	MTA	ZV	ZC	MTA	MTA	MTA	MTA	ZV	ZV	ZV
8	ZV	ZV	ZV	ZV	ZC	ZC	ZC	ZC	ZV	ZV	ZV	ZV
10	ZV	ZV	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	ZC	ZV	ZV	ZV
12	ZV	ZV	ZV/MTR/RE	ZV/MTR/RE	ZC	ZC	ZC	ZC	ZV/MTR/RE	ZV	ZV	ZV
14	CA	CA	ZV/MTR/RE	ZV/MTR/RE	ZC	ZC	ZC	ZC	ZV/MTR/RE	ZV	ZV	ZV
16	CA	CA	ZV	ZV	ZC	ZC	ZC	ZC	ZV	ZV	CA	ZV
18	CA	CA	ZV	ZV	ZC	ZC	ZC	ZC	ZV	ZV	CA	ZV
20	ZV	ZV	ZV	ZV	ZC	ZV	ZC	ZC	ZV	ZV	CA	ZV
22	ZV	ZV	ZV	ZV	ZC	MTA	ZV	ZV	ZV	ZV	ZV	ZV

**Resumo das Estratégias de Projeto para o período de ocupação (das 8h às 20h)**

35,7 %	Conforto (ZC)
46,4 %	Ventilação (ZV)
7,1 %	Ventilação/Massa Térmica Resfriamento (MTR)/Resfriamento Evaporativo (RE)
10,7 %	Condicionamento Artificial (CA)

Figura 16. Diagnóstico climático da cidade de São Paulo (BR)

[24] Frota & Schiffer (1995) atentam para o caráter indicativo das "zonas de conforto", recomendando a análise de sua aplicabilidade às condições específicas de cada projeto em cada contexto particular.

[25] Os dados de temperatura e umidade relativa do ar plotados na carta psicrométrica são valores médios horários.

[26] A estratégia de resfriamento evaporativo é recomendada para momentos com baixa umidade relativa do ar.

[27] Estudos anteriores desenvolvidos por Gonçalves apontaram a ocorrência de temperatura média máxima de 28°C em Nova York, sem a necessidade de condicionamento artificial. Esses estudos utilizaram dados de um período de medições compreendendo os anos de 1961 a 1990 (Gonçalves, 2003). Comparativamente aos resultados do diagnóstico climático aqui apresentado que utilizou uma base de dados mais recente com dados medidos até o ano de 2005, ressalta-se o impacto das mudanças climáticas atuais.

De acordo com o diagnóstico climático realizado, a cidade de Nova York apresenta 31% das horas ocupadas do ano em conforto (ZC), compreendendo os meses de abril a junho, e de agosto a outubro (Figura 7). No período de verão, a principal estratégia de projeto para obtenção de condições de conforto é incrementar a ventilação no edifício (ZV). Isso acontece de junho a agosto, sendo recomendada a ventilação aliada ao uso de materiais com inércia térmica expostos (MTR) e/ou à realização de resfriamento evaporativo<sup>26</sup> por 8,3% do ano. O condicionamento artificial (CA) é necessário em apenas 3,6% das horas do ano, ocorrendo no período da tarde em julho, com temperatura média máxima chegando aos 32°C<sup>27</sup>. Porém a maior demanda verificada para edifícios nas condições climáticas de Nova York é promover o aquecimento dos ambientes. Nesse sentido, conforto pode ser obtido por 21,4% do ano com a utilização de estratégias passivas, recomendando-se o aquecimento solar (ASP) e o emprego de materiais com inércia térmica expostos (MTA). Contudo, um maior rigor nas condições de temperatura e umidade do ar acontece no período entre dezembro e fevereiro, quando o uso de aquecimento artificial (AA) é necessário o dia todo, representando 26,2% das horas ocupadas do ano.

Com relação às cidades alemãs de Frankfurt Am Main, Berlin e Bonn, observa-se a semelhança de suas condições climáticas (Figuras 8, 9 e 10, respectivamente). Em ambas as cidades o período de verão encontra-se praticamente dentro da zona de conforto, sendo essa condição verificada por 38,1% do ano em Frankfurt e 39,3% em Berlin (compreendendo os meses de maio a setembro) e por 33,3% das horas em Bonn (de abril a setembro). Para Frankfurt e Bonn, recomenda-se o incremento da ventilação, isoladamente ou juntamente com a utilização de materiais com inércia térmica expostos no ambiente, sendo por apenas 1,2% das horas em Frankfurt e em 6% do ano para Bonn. Assim como para Nova York, a maior demanda verificada nessas cidades alemãs é por aquecimento artificial em cerca de 30% das horas ocupadas do ano, incluindo o dia todo no período de dezembro a fevereiro para Frankfurt e Bonn, e, com maior rigor, compreendendo todo o período ocupado entre novembro e fevereiro para Berlin. Nos períodos de menor rigor recomendam-se as estratégias de aquecimento solar passivo e uso de materiais com inércia térmica expostos, compreendendo o restante do ano (aproximadamente 30% das horas ocupadas).

Similarmente às cidades alemãs, o período de verão em Londres encontra-se primordialmente em conforto, sendo essa condição observada por 29,8% do ano, entre os meses de maio e setembro (Figura 11). Adicionalmente, a condição de desconforto verificada no mês de agosto, compreendendo as horas iniciais e finais do período de ocupação, pode ser resolvida com o incremento da ventilação aliada ao uso de materiais com inércia térmica expostos no edifício. Tendo em vista o clima de Londres, o maior requisito verificado para obtenção de conforto é o uso de aquecimento artificial, como nas cidades alemãs, por 29,8% das horas ocupadas. Ainda para o período de inverno, destaca-se a ocorrência de elevadas umidades relativas do ar, com média de 80%UR, e temperatura média mínima de 4°C. Para as horas de menor rigor climático, estratégias passivas de aquecimento são recomendadas, sendo ASP e MTA por 19% do ano cada.

A cidade de Tokyo apresenta verões quentes e úmidos, com temperaturas médias chegando a 30,5 °C e umidades relativas em torno de 90% (Figura 14). Para esses períodos recomenda-se ventilar o interior do edifício, e, adicionalmente, utilizar materiais com inércia térmica expostos (cerca de 19% das horas). Nos dias mais quentes é necessário uso de condicionamento artificial, o que acontece durante praticamente todo o período de ocupação no mês de julho e no final da tarde em agosto - o correspondente a 9,5% do ano. O período de inverno continua úmido, porém as temperaturas caem consideravelmente, atingindo valores abaixo de 0°C. Para obtenção de conforto nessa época do ano são recomendadas estratégias passivas de aquecimento (MTA e ASP) por 33% das horas ocupadas. Já nos dias mais frios o aquecimento artificial dos ambientes torna-se necessário, incluindo o início e no final do dia no mês de dezembro, e durante todo o dia em janeiro (14,3% do ano).

Diferentemente das cidades já mencionadas, a cidade australiana de Sydney situa-se no hemisfério sul, como as cidades brasileiras. Observando-se o diagnóstico climático para Sydney, nota-se a condição de conforto espalhada ao longo do ano todo (com exceção do mês de dezembro), compreendendo 58,3% das horas ocupadas (Figura 12). Por 20,2% do ano o incremento da ventilação é desejável, aliando-se o uso de materiais com inércia térmica expostos, e, em momentos com baixas umidades relativas do ar, podendo-se adotar a estratégia de resfriamento evaporativo. O uso de condicionamento artificial é necessário apenas no mês de dezembro, quando a temperatura média máxima chega a 35°C, a partir das 10 horas da manhã. De modo diverso às cidades européias anteriormente comentadas, o clima de Sydney não apresenta inverno rigoroso, com temperatura média mínima de aproximadamente 11°C. Durante esse período as condições de conforto podem ser obtidas por meio de estratégias passivas, fazendo uso de massa térmica (11,9% das horas) e promovendo aquecimento solar passivo (1,2% do ano).

Mantendo-se o padrão de Sydney, o clima da outra cidade australiana considerada, Melbourne, apresenta 50% das horas do ano em conforto, porém concentradas entre setembro e abril (Figura 13). Na outra metade do ano, o uso de estratégias exclusivamente passivas se mostra suficiente para obter condições de conforto. Nos dias mais quentes, quando a temperatura média máxima alcança 32°C, recomenda-se a promoção da ventilação aliada à massa térmica para resfriamento e/ou à estratégia de resfriamento evaporativo. Tal situação acontece por 10,7% das horas em janeiro e fevereiro. Já a demanda por aquecimento acontece por um período mais extenso (38% do ano), concentrada entre os meses de maio a setembro, e pode ser suprida com a exposição de materiais com inércia térmica e com aquecimento solar passivo. As horas de conforto acontecem nas estações intermediárias, representando 23,8% do ano.

Na cidade do Rio de Janeiro, por sua vez, nota-se que o desconforto acontece pela ocorrência de elevadas temperaturas e umidades do ar ao longo de todo o ano (Figura 15). Com temperatura média máxima de 34°C e média de 80% de umidade relativa anual, o condicionamento artificial é necessário por 63,1% das horas ocupadas para arrefecimento e controle da umidade. Destaca-se a necessidade de tal estratégia durante todo o período de ocupação nos meses de dezembro a março. Verificam-se poucas horas do ano na zona de conforto (3,6%); estas aparecem concentradas nos meses de junho e julho no período da manhã. As temperaturas caem pouco nos dias de inverno, chegando à mínima média de 22°C. Deste modo, para o restante do ano (cerca de 33% das horas), condições de conforto podem ser alcançadas com o incremento da ventilação, além do uso complementar de materiais com inércia térmica expostos.

Já o clima da cidade de São Paulo apresenta condições de conforto por 35,7% do ano, concentrado nos meses de maio a agosto, ou seja, incluindo o período de inverno, no qual a temperatura média mínima é de 18°C (Figura 16). A principal estratégia recomendada para o restante do ano (a dizer, por 46,4% das horas ocupadas) é a ventilação, inclusive para dissipar a umidade do ar, cuja média anual gira em torno de 80%. A ventilação pode estar aliada ao uso de materiais com inércia térmica expostos, e, em momentos com baixa taxa de umidade relativa do ar, pode-se tirar proveito do resfriamento evaporativo. Nas horas mais quentes do ano, com temperatura média máxima chegando a 33°C, o condicionamento artificial se faz necessário, compreendendo o equivalente a 10,7% do período de ocupação.

A Tabela 1 apresenta um resumo das estratégias projetuais recomendadas para as diferentes cidades.

Tabela 1. Resumo das estratégias bioclimáticas recomendadas para as diferentes cidades

Estratégias	Cidades									
	Nova York (USA)	Frankfurt Am Main (ALE)	Berlin (ALE)	Bonn (ALE)	Londres (ING)	Tokyo (JPN)	Sydney (AUS)	Melbourne (AUS)	São Paulo (BRA)	Rio de Janeiro (BRA)
Conforto (ZC)	31%	38,1%	39,3%	33,3%	29,8%	23,8%	58,3%	50%	35,7%	3,6%
Ventilação (ZV)	9,5%	–	–	2,4%	–	16,7%	7,1%	–	46,4%	28,6%
Ventilação / Massa Térmica Resfriamento (MTR)	8,3%	1,2%	–	3,6%	2,4%	2,4%	–	–	–	4,8%
Ventilação / Massa Térmica / Resfr. Evaporativo (RE)	–	–	–	–	–	–	13,1%	10,7%	7,1%	–
Condicionamento Artificial (CA)	3,6%	–	–	–	–	9,5%	7,1%	–	10,7%	63,1%
Massa Térmica Aquecimento (MTA)	10,7%	16,7%	13,1%	15,5%	19%	20,2%	11,9%	20,2%	–	–
Aquecimento Solar Passivo (ASP)	10,7%	15,5%	13,1%	13%	19%	13,1%	1,2%	17,9%	–	–
Aquecimento Artificial (AA)	26,2%	28,6%	34,5%	12%	29,8%	14,3%	–	–	–	–

[28] Essa afirmação mostrou-se pertinente nos diagnósticos climáticos realizados para as cidades brasileiras estudadas neste capítulo, sendo a ventilação a principal estratégia passiva recomendada para resfriamento e dissipação de umidade no interior dos edifícios nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro.

Com base nos diagnósticos realizados, as principais demandas para o projeto de edifícios nas diferentes condições climáticas são:

- nas cidades europeias Frankfurt, Berlin, Bonn e Londres, o aquecimento dos ambientes, por até 68% do ano (ativo e passivo);
- nas cidades de Nova York e Tókyo, as quais apresentam certo rigor tanto no verão quanto no inverno, o uso de estratégias ativas de condicionamento ambiental; com destaque para a demanda por aquecimento, ativo e passivo;
- nas cidades australianas e brasileiras as maiores demandas referem-se aos períodos mais quentes; Sydney e Melbourne apresentam-se em conforto por mais de 50% do ano; já a cidade do Rio de Janeiro se destaca pelo rigor do clima, com necessidade de condicionamento artificial por mais de 60% ano, enquanto que em São Paulo a maior demanda é pela ventilação dos ambientes por até 53,5% do ano (isoladamente ou aliada à MTR).

Tendo em vista as características climáticas e as demandas verificadas para os edifícios em cada localidade, enfatiza-se a importância do desenvolvimento de um projeto arquitetônico específico para cada contexto, viabilizando, desse modo, beneficiar-se dos ou atenuar os impactos do clima externo nas condições ambientais internas, ao máximo, durante o ano.

### 1.1.2.2. Ventilação

“A ventilação é apontada, frequentemente, como a estratégia bioclimática mais eficiente para obtenção de conforto térmico nos espaços urbanos e arquitetônicos”<sup>28</sup> (Bittencourt, 2005).

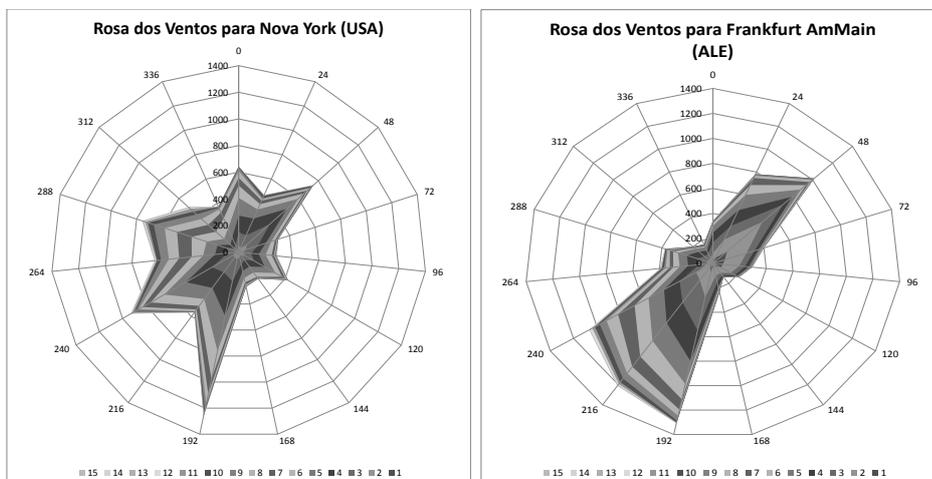
Nesse sentido, com base no diagnóstico climático realizado para as dez cidades de estudo, observa-se que a adoção da estratégia de ventilação natural, isoladamente ou aliada a estratégias passivas de resfriamento, é recomendada por cerca de 20% do ano para as cidades de Nova York, Tokyo e Sydney; é desejável por até 33,4% do tempo para o Rio de Janeiro; e mostra-se preponderante para o alcance de condições adequadas de conforto térmico para a cidade de São Paulo, sendo recomendada por até 53,5% do ano.

No entanto, considerando-se que nas horas em que as condições de temperatura e umidade do ar externo já configuram situações desejáveis de conforto térmico (correspondendo às horas em “conforto” do diagnóstico climático) e nos períodos em que são recomendadas estratégias passivas (como, por exemplo, MTA e ASP) a ventilação é necessária (pelo menos) para suprir as exigências mínimas de salubridade nos edifícios, ressalta-se a relevância da ventilação natural por cerca de 70% do ano nas cidades de Nova York, Tokyo, Frankfurt, Berlin, Bonn e Londres; por até 89,2% do tempo em São Paulo e por mais de 90% do ano nas cidades australianas de Sydney e Melbourne.

Tendo em vista a importância da ventilação natural para as cidades analisadas, e considerando-se a condição dinâmica do vento, podendo variar a cada momento, as Figuras 17 a 26 trazem a rosa dos ventos das dez cidades analisadas. Essas apresentam as direções de incidência do vento, com indicativo de sua predominância, e ilustram a frequência de ocorrência de diferentes valores de velocidade (em escala) para cada direção, apontando, deste modo, o potencial de ventilação por ação dos ventos para cada localidade<sup>29</sup>. Nas figuras, a escala de velocidade compreende intervalos variando a cada 1m/s, até 15m/s.

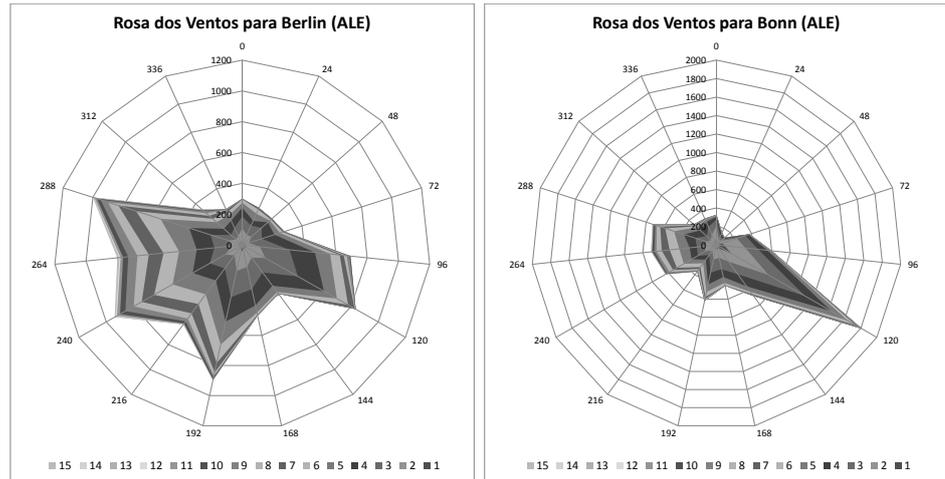
É possível observar em algumas cidades a incidência do vento em uma única direção por parte predominante do ano, caso de Bonn, a Sudeste, Londres, a Sul e Melbourne a Norte. Verifica-se em outras cidades a condição de incidência preponderante em duas direções, como ocorre em São Paulo (1ª Sul e 2ª Norte), Tokyo (1ª Norte e 2ª Nordeste), Frankfurt Am Main (1ª Sudoeste e 2ª Nordeste) e marcadamente no Rio de Janeiro, com frequência de ocorrência equivalente a Sul e a Norte. Em contrapartida, uma maior variabilidade nas direções de incidência do vento é notada para Berlin, Sydney e Nova York.

Para essas cidades, a maior frequência de ocorrência de velocidades nas direções predominantes aparece na faixa entre 2 m/s e 4 m/s.

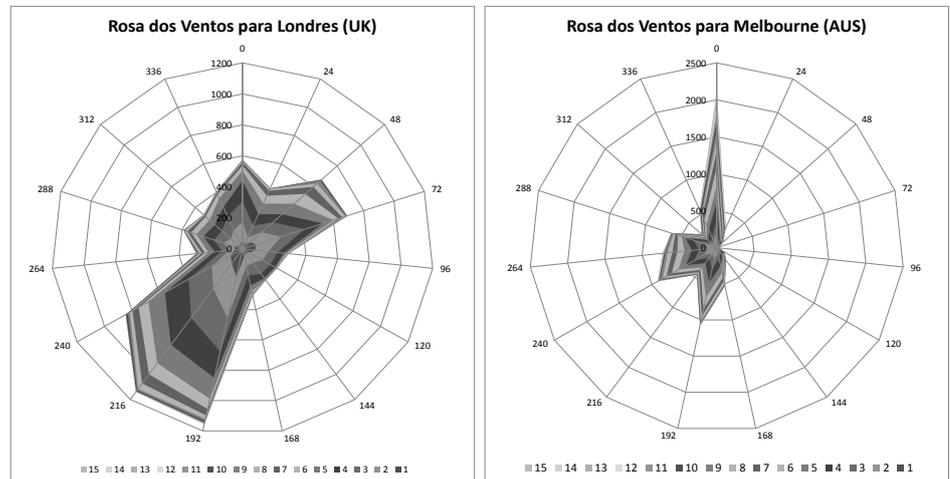


Figuras 17 e 18. Rosa dos ventos para as cidades de Nova York, Frankfurt: frequência de ocorrência de direção e velocidade do vento ao longo do ano

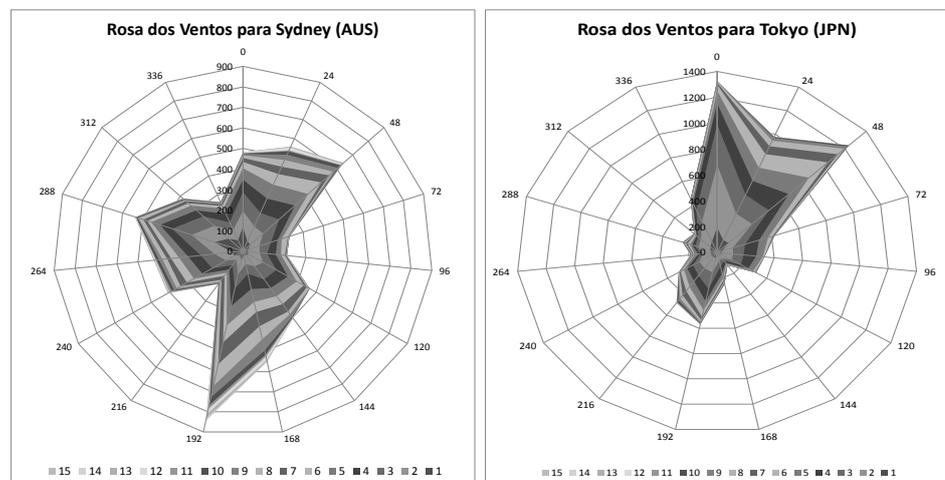
[29] Esclarece-se que os dados apresentados são fruto de medições em estações meteorológicas, as quais geralmente localizam-se distantes dos centros urbanos. Sendo assim, as informações aqui mencionadas são indicativas do potencial de ventilação de cada local, porém as reais condições de ventilação de cada edifício específico vão depender, também, de outros fatores como o projeto arquitetônico, o dimensionamento e o posicionamento de aberturas, e a configuração do entorno, com a existência ou não de obstruções.



Figuras 19 e 20. Rosa dos ventos para as cidades de Berlin e Bonn: frequência de ocorrência de direção e velocidade do vento ao longo do ano

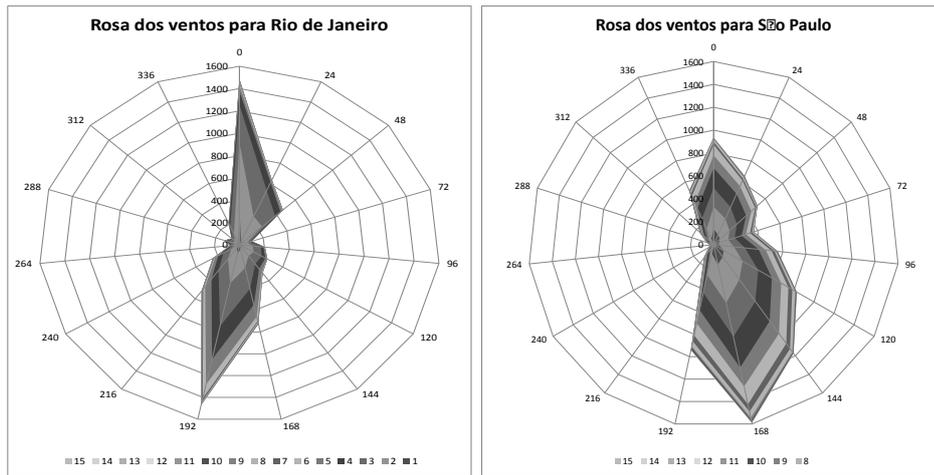


Figuras 21 e 22. Rosa dos ventos para as cidades de Londres e Melbourne: frequência de ocorrência de direção e velocidade do vento ao longo do ano



Figuras 23 e 24. Rosa dos ventos para as cidades Sydney e Tokyo: frequência de ocorrência de direção e velocidade do vento ao longo do ano

[30] Os valores totais anuais referem-se à soma das médias mensais.



Figuras 25 e 26. Rosa dos ventos para as cidades Rio de Janeiro e São Paulo: frequência de ocorrência de direção e velocidade do vento ao longo do ano

### 1.1.2.3. Radiação solar

A Tabela 2 traz dados mensais de radiação solar global (no plano horizontal) para as dez cidades analisadas. Esses dados são indicativos do potencial de radiação solar anual de cada localidade, e, portanto, dão indícios da necessidade de controle solar dos seus edifícios.

Analisando-se a distribuição da radiação solar ao longo do ano, é possível perceber a variação nos níveis de radiação para as cidades localizadas no hemisfério norte. Como exemplo, a média mensal de radiação global para Londres varia de 23 W/m<sup>2</sup> no mês de dezembro (inverno) até 209 W/m<sup>2</sup> em julho (verão).

Com relação às cidades do hemisfério sul (australianas e brasileiras), é possível perceber uma menor variação anual, e valores máximos mensais elevados. Para a cidade de São Paulo, os valores das médias mensais variam de 131 W/m<sup>2</sup> em junho (inverno) até 244 W/m<sup>2</sup> no mês de dezembro (verão), mas foram registrados valores de até 1095 w/m<sup>2</sup>.

A análise dos valores totais anuais<sup>30</sup> evidencia a ocorrência de valores acima de 2000 W/m<sup>2</sup> para as cidades brasileiras e australianas. Nota-se que a radiação total anual

Tabela 2. Dados de radiação solar global para as cidades analisadas: médias e máximas mensais, e total anual

Radiação Solar Global (W/m <sup>2</sup> )		Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	ANO
Nova York	média	69	108	153	186	230	249	241	248	174	149	85	63	1955
	máxima	529	639	840	914	967	982	957	916	831	714	550	442	
Berlín	média	22	49	80	160	202	210	213	181	114	64	33	17	1346
	máxima	243	434	607	769	860	862	870	780	681	511	336	207	
Frankfurt Am Main	média	26	56	110	160	199	192	224	189	127	78	31	22	1413
	máxima	284	448	679	803	896	903	888	841	697	577	331	263	
Bonn	média	29	56	92	141	203	185	197	173	117	67	36	25	1321
	máxima	309	425	610	792	877	861	882	771	661	546	348	260	
Londres	média	30	50	88	152	205	204	209	181	124	73	40	23	1379
	máxima	285	447	644	803	884	893	869	811	689	559	351	223	
Sydney	média	275	234	203	156	111	91	107	148	191	235	249	266	2265
	máxima	1086	1027	939	793	603	504	568	725	865	1006	1065	1079	
Melbourne	média	289	255	204	139	90	67	81	115	170	222	272	269	2174
	máxima	1072	1011	886	701	570	388	480	661	823	972	1031	1066	
Tokyo	média	105	131	148	192	200	173	183	200	145	122	104	87	1789
	máxima	576	753	881	960	998	991	972	942	882	768	628	513	
Rio de Janeiro	média	269	272	222	195	158	146	151	178	196	225	260	258	2530
	máxima	1055	1055	1010	879	786	679	736	830	954	1023	1079	1074	
São Paulo	média	235	224	202	178	139	131	139	173	193	211	232	244	2302
	máxima	1068	1044	1026	874	780	677	719	839	926	1013	1095	1085	

[31] A quantidade de radiação solar incidente em cada local varia em função da época do ano e da latitude, em decorrência do movimento aparente do sol em relação a Terra.

para São Paulo e Rio de Janeiro representa aproximadamente o dobro da radiação global nas cidades de Berlin, Bonn e Londres no ano.

Com base nessas informações é possível afirmar, apenas com base no clima externo, a necessidade de proteção da envoltória dos edifícios de escritórios - os quais por premissa apresentam alta geração de carga térmica -, no intuito de controlar os ganhos de calor pelo ano todo nas cidades brasileiras e australianas, e por períodos do ano nas demais cidades (principalmente nos meses de verão). Tal fato é ressaltado para as cidades brasileiras, cujo diagnóstico climático anteriormente realizado recomendou a adoção de estratégias de arrefecimento por até 64,2% ano em São Paulo e por até 96,5% do tempo no Rio de Janeiro (inclusive com a necessidade de utilização de meios ativos por mais de 60% do ano na cidade do Rio de Janeiro), Figuras 15 e 16.

Para Nova York, Tokyo e para as cidades européias analisadas, o diagnóstico climático apontou uma demanda de aquecimento dos ambientes por mais de 40% das horas do ano. Observa-se nas Figuras 7 a 11, na Figura 14 e na Tabela 2 que tal demanda ocorre principalmente nos meses em que os valores de radiação solar global são menores. Portanto, nesses períodos, é desejável o aproveitamento da radiação solar, visando a satisfação da demanda verificada. O mesmo é válido para as cidades australianas, por um período de até 13,1% em Sydney, e até 38,1% em Melbourne (Figuras 12 e 13).

Cabe enfatizar o caráter genérico dessa análise, devendo-se proceder a uma avaliação do desempenho térmico dos edifícios para o estabelecimento dos requisitos específicos de proteção solar num ciclo diário e anual. Tal avaliação deve considerar os aspectos do projeto arquitetônico, as especificidades da atividade desenvolvida e do padrão de ocupação dos escritórios, e as condicionantes do entorno do edifício em seu local de implantação.

### 1.1.2.3. Disponibilidade de luz natural

A disponibilidade de luz natural evidencia o potencial de uso da iluminação natural em cada local, desde que seja devidamente aproveitada pelo projeto de arquitetura dos edifícios. Esse parâmetro varia com o clima e a latitude de cada cidade ou região<sup>31</sup>, sendo que quanto maior for a latitude de um local, menor será a quantidade de radiação solar recebida (Frota & Schiffer, 1995).

A disponibilidade de luz natural nos diferentes contextos foi calculada no software Climaticus (Alucci, 2005). A Figura 27 exemplifica o potencial para a cidade de São Paulo. O gráfico apresentado relaciona o nível mínimo de iluminâncias em klux com a frequência de ocorrência das mesmas durante o período anual, em valores percentuais. Essa relação é inversamente proporcional, pois quando o nível exterior aumenta, diminui a frequência de ocorrência e vice-versa.

Na leitura do gráfico verifica-se, por exemplo, que em 80% das horas de sol do ano a disponibilidade de luz natural em um plano horizontal desobstruído na cidade de São Paulo é de aproximadamente 10.000lux.

Os resultados calculados para as demais cidades são apresentados na Tabela 3, em ordem crescente de potencial. Observa-se que as cidades brasileiras, São Paulo e Rio de Janeiro, possuem as menores latitudes (cerca de 23°S) e os maiores valores de iluminância, seguidas pelas cidades australianas. Em oposição, as maiores latitudes do conjunto (todas ao redor de 50°N) e as menores disponibilidades de luz no céu são apresentadas pelas cidades européias, Londres, Berlin, Bonn e Frankfurt. Nota-se, por exemplo, que a iluminância em Londres corresponde à terça parte do potencial da cidade do Rio de Janeiro, com 4.000lux e 12.000 lux, respectivamente.

Vale ressaltar que a maximização do uso da iluminação natural nos edifícios depende de seu devido aproveitamento pelo projeto de arquitetura, de acordo com o potencial de cada local e de sua interface com as demais variáveis climáticas.

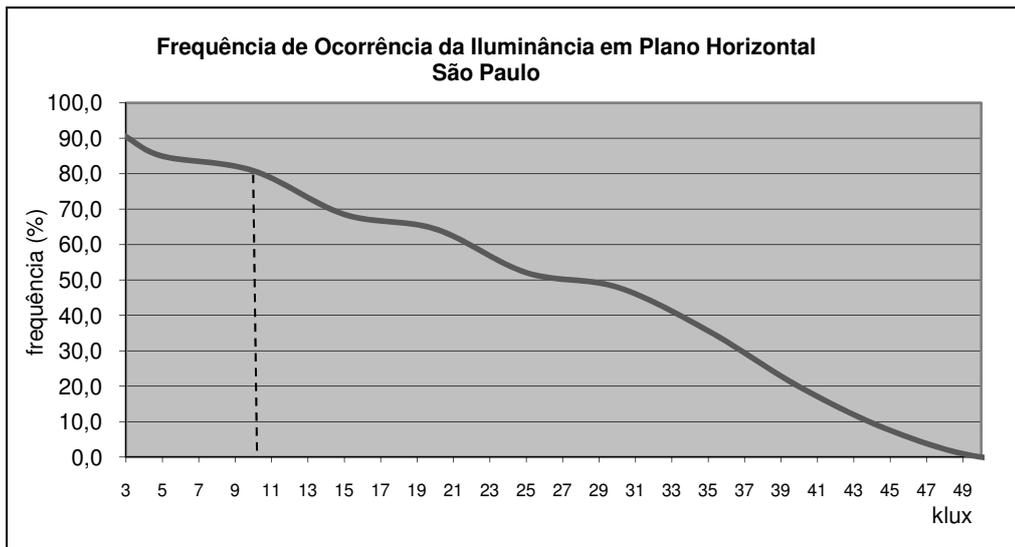


Figura 27. Frequência de ocorrência de iluminância no plano horizontal em São Paulo; destaque para 80% do tempo

Tabela 3. Frequência de ocorrência de iluminância no plano horizontal para 80% das horas do ano das cidades analisadas

Cidades	Latitude	Iluminância no plano horizontal: 80% horas ano
Londres (ING)	51°N	4.000 lux
Berlin (ALE)	52°N	4.000 lux
Bonn (ALE)	50°N	5.000 lux
Frankfurt (ALE)	50°N	6.500 lux
Tokyo (JAP)	35°70'N	7.000 lux
Nova York (USA)	40°N	7.300 lux
Melbourne (AUS)	37°81'S	8.000 lux
Sydney (AUS)	34°S	8.800 lux
São Paulo (BRA)	22°54'S	10.000 lux
Rio de Janeiro (BRA)	23°30'S	12.000 lux

Nesse contexto, recomendam-se cuidados no projeto arquitetônico dos edifícios a fim de evitar a ocorrência de ofuscamentos por excesso de luminosidade no ambiente interno ou por contraste. O uso adequado da luz natural deve considerar a necessidade ou não de controles para cada local específico, seja por meio de elementos de proteção e/ou direcionamento da luz incidente, externos e/ou internos. O controle da luz é um aspecto fundamental para a qualidade da iluminação natural, impactando na homogeneidade de sua distribuição e eficiência no ambiente interno.

Com a maximização da iluminação natural dos ambientes e a conseqüente redução do uso de iluminação artificial contribui-se, ainda, para a eficiência energética do edifício como um todo. Essas recomendações são enfatizadas para as localidades com maior disponibilidade de luz natural, como as cidades de São Paulo e Rio de Janeiro.

Em relação às cidades europeias, as quais apresentam menor disponibilidade de luz no céu, estratégias de projeto podem ser empregadas nos edifícios de escritórios para maximizar o seu potencial, e atingir níveis mínimos de iluminância necessários para o conforto visual dos usuários. Os níveis mínimos de iluminância necessários para o desenvolvimento da atividade de escritórios são estipulados em normas técnicas de cada país ou cidade específica.

#### 1.1.2.4. Considerações climáticas finais

Por fim, acrescenta-se que, apesar da importância do conhecimento do clima para garantir o melhor desempenho ambiental do edifício de escritórios e sua eficiência energética, grande parte do sucesso das estratégias passivas de projeto (ou bioclimáticas) estão embasadas em conceitos de conforto ambiental que desafiam os padrões internacionais de conforto térmico interno, como apontado no item 1.1.1, os quais giram em torno 20°C de temperatura do ar e umidade relativa de 50% (Gonçalves, 2003). A esse respeito, atualmente o conceito do conforto adaptativo é uma alternativa para a obtenção de conforto térmico dos usuários admitindo variações na temperatura interna do edifício ao longo do ano, com base na alteração das temperaturas externas.

## 1.2. Panorama Internacional

No cenário arquitetônico internacional da primeira década dos anos 2000 os aspectos ambientais, energéticos e de conforto para os usuários de edifícios de escritório aparecem vinculados às certificações de “green building” ou selos de “edifícios verdes”, numa tendência crescente.

No entanto, as mudanças nos projetos arquitetônicos e a produção de edifícios mais sustentáveis para seus contextos específicos teve início antes das certificações adquirirem tamanha atenção no contexto mundial, principalmente em países europeus, com o estabelecimento de *standards* e regulamentações de desempenho térmico e energético.

As primeiras regulamentações restringiam-se ao isolamento térmico do edifício, tendo início nos países Escandinavos em 1973, logo após a “crise do petróleo”. Na Alemanha, a primeira prescrição normativa de desempenho térmico das edificações foi aprovada em 1977, caracterizada como “Lei de economia de energia”, WSchVo (*Wärmeschutzverordnung*) 1977 (Cunha et al., 2008). Iniciativas posteriores foram tornando-se mais exigentes, incluindo aspectos relacionados à taxa de ventilação dos edifícios, à eficiência de sistemas de condicionamento ambiental (para aquecimento, refrigeração e ventilação dos edifícios), à eficiência de sistemas de iluminação artificial, e, mais recentemente, abordando requisitos de conforto térmico para os usuários além de indicar métodos de cálculos a serem usadas pelos projetistas no aprimoramento dos projetos (Gauzin-Muller, 2002; Reiser et al., 2008; Leão et al., 2008). Mencionam-se as regulamentações de desempenho térmico (*Réglementation Thermique*) RT2000 e RT2005 na França, e a sequência de normas alemãs WSchVo 1984, WSchVo 1995, EnEV (*Energieeinsparverordnung*) 2002, EnEV 2004, e a versão atual EnEV 2008 / DIN 18599 (*Energy Efficiency of Buildings - Calculation of the Net, Final and Primary Energy Demand for Heating, Cooling, Ventilation, Domestic Hot Water and Lighting*).

A demanda pelo aprimoramento dos edifícios, principalmente em conformidade com as metas de redução de consumo de energia e redução de emissões de CO<sub>2</sub> estabelecidas pelo Protocolo de Kyoto, aliada às normas e regulamentações de desempenho térmico e energético europeias alavancou o desenvolvimento de novos materiais e tecnologias. Por outro lado, salientou a necessidade de se avaliar o impacto ambiental do processo de operação e construção dos edifícios, contribuindo para o desenvolvimento de sistemas ou ferramentas de avaliação, chamadas de certificações de “green building” (Silva, 2003).

As primeiras certificações de “green building” foram criadas em países do hemisfério norte na década de 1990. Num período de aproximadamente dez anos, vários países desenvolveram seus próprios sistemas de avaliação ou certificações, para serem aplicados aos seus edifícios, de acordo com cada contexto específico. Mencionam-se o BREEHAM (*Building Research Establishment Environmental Assessment Method*, 1990) na Inglaterra, o BEPAC (*Building Environmental Performance Assessment Criteria*, 1993) no Canadá, o LEED (*Leadership in Energy and Environment Design*, 1994) nos Estados Unidos, o HQE (*Hauté Qualité Environnementale*, 1996) na França, o CASBEE (*Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency*, 2001) para os contextos do Japão e da Ásia, e o GREEN STAR australiano (2002), entre outros.

Cada sistema de avaliação possui suas particularidades, mas de modo geral, constituem sistemas de pontuação com formato *checklist* para a obtenção de selos, em caráter voluntário, e atuam como instrumento de valorização dos edifícios no mercado. As aplicações pretendidas para esses sistemas ou certificações variam, incluindo desde sua utilização como ferramentas de apoio ao projeto, até o emprego como ferramentas de avaliação pós-ocupação (Silva, 2003).

Em meio a esse contexto, destaca-se um conjunto de edifícios de escritórios recentes argumentando ser ambientalmente conscientes e energeticamente eficientes, em localidades diversas no planeta. Dentre esses, nota-se a existência de alguns exemplos que aclamam incorporar a ventilação natural em seu interior como parte do discurso ambiental e energético.

### **1.2.1. Edifícios de escritórios no contexto internacional a partir do final da década de 1990**

Foram identificados exemplos de edifícios de escritórios sendo projetados, em construção ou já operantes em diversas cidades do mundo nas últimas duas décadas, os quais aclamam a incorporação da ventilação natural nos ambientes internos como parte do desenvolvimento de uma arquitetura aprimorada para o desempenho ambiental e energético. Uma das características de destaque do projeto dos edifícios dessa geração é a estratégia de condicionamento ambiental em modo-misto, a qual geralmente aparece associada à especificação de fachadas elaboradas e de alta tecnologia.

A Europa concentra o maior número de edifícios de escritórios que argumentam a inclusão da ventilação natural em meio a um conjunto de estratégias e elementos adotados nos projetos arquitetônicos, os quais frequentemente divergem da abordagem comercial tradicional. Destacam-se exemplos presentes nas cidades de Frankfurt Am Main, Berlin e Bonn, na Alemanha, e edifícios em Londres, na Inglaterra, países que podem ser considerados vitrines da arquitetura européia.

Em contraposição ao cenário europeu, analisando-se alguns dos exemplos de edifícios de escritórios da geração compreendida entre o final da década de 1990 e os anos 2000, em destaque no cenário norte-americano, constata-se a baixa probabilidade de se encontrar edifícios incorporando a ventilação natural. Nota-se que a produção recente dos edifícios de escritórios nos Estados Unidos foca nos aspectos tecnológicos, inclusive no discurso ambiental proferido, o qual é pautado pela eficiência dos sistemas. Por esse motivo, a arquitetura dos escritórios no contexto norte-americano será comentada brevemente, com base em três exemplos de edifícios presentes na cidade de Nova York.

Diante do discurso ambiental e energético internacional, a incorporação da ventilação natural é aclamada no projeto de edifícios em outros contextos, com características urbanas, climáticas, econômicas e sociais diversas. Apresentando uma maior liberdade arquitetônica e experimentação de soluções passivas e ativas em prol de um

[32] A solução de brise do New York Times é uma releitura da solução desenvolvida pelo RPBW em 1999 para o edifício Debis, em Berlin (apresentado na sequência do capítulo 1), adaptada ao contexto da cidade de Nova York.

[33] São vidros que fazem um “controle” da transmissão de radiação solar, geralmente empregados para permitir maior transmissão da faixa de radiação visível, e bloquear parte da radiação de onda longa (calor) (Carmody, 2004).

aprimoramento no desempenho ambiental, na eficiência energética e no conforto dos usuários, exemplos de edifícios dessa geração existentes nas cidades australianas de Sydney e Melbourne, e na cidade japonesa Tokyo, serão apresentados.

### 1.2.1.1. Nova York (Estados Unidos)

Os edifícios de escritórios norte-americanos tradicionalmente possuem plantas mais profundas, privilegiando a eficiência do espaço interno (ou a obtenção da maior área útil de escritórios possível), e frequentemente fazem uso de sistemas para condicionamento ambiental.

De modo geral, o que se verifica na produção recente norte-americana é um enfoque nos aspectos tecnológicos dos edifícios, mantendo-se o padrão arquitetônico comercial de torres de vidro seladas com core de elevadores central e climatização exclusivamente artificial das gerações anteriores.

Com relação ao desempenho dos edifícios dessa geração, as inovações verificadas referem-se à eficiência energética, mais especificamente por meio do uso de equipamentos mais eficientes (ou que demandam menor consumo); da especificação de tipos de vidros diferenciados nas fachadas; e, em alguns casos, da presença de elementos e/ou tecnologias inovadoras para geração de energia limpa, como as células fotovoltaicas.

Observa-se que o projeto dos novos edifícios segue (rigidamente) aos requisitos da certificação LEED, incluindo aspectos de gerenciamento de água e resíduos, utilização de materiais recicláveis, entre outros.

Cabe mencionar o edifício 4 Times Square, projetado pelo escritório Fox and Folwe Architects, e construído em 1999 na cidade de Nova York, um dos edifícios pioneiros dessa geração a apresentar artifícios para geração de energia limpa (Figuras 28 e 29).

O edifício possui células fotovoltaicas integradas à fachada do tipo cortina de vidro, elaboradas especificamente para essa função, de acordo com as dimensões do edifício. Os painéis de vidro laminado com células fotovoltaicas estão presentes nas fachadas orientadas a Sul e a Leste, do 37° ao 43° pavimentos (IEA-PVPS, 2009). Adicionalmente, dois módulos de células de combustível estão presentes no subsolo. Entretanto, dados do edifício em operação indicaram que a produção de energia limpa pelos painéis fotovoltaicos somada à energia gerada pelas células combustíveis não ultrapassa 2% do consumo total do edifício (Gonçalves, 2003).

Também localizado em Nova York, o edifício New York Times (2004), o qual abriga a sede do jornal de mesmo nome, traz em seu projeto arquitetônico um elemento que o diferencia do modelo de edifício de escritórios tradicional da arquitetura norte-americana (Figuras 30 a 32).

No edifício, projeto dos escritórios Renzo Piano Building Workshop (RPBW) e Fox & Fowle, tubos brancos cerâmicos estão dispostos externamente às fachadas envidraçadas, com diferentes espaçamentos em função da necessidade de proteção solar e de permitir vistas ao exterior – os elementos são menos espaçados na linha da visão, central<sup>32</sup> (Wells, 2005), Figura 31.

Tendo em vista a ocorrência tanto de verões quanto de invernos rigorosos em Nova York, a solução inovadora de brise foi utilizada para reduzir os ganhos de calor pela fachada em dias quentes de verão (Wells, 2005) e, na condição de inverno, evitar o acúmulo de neve no dispositivo (o qual possui forma cilíndrica) (Marcondes, 2004). As fachadas são compostas por vidros duplos transparentes fixos, *spectrally selective*<sup>33</sup>, de baixa emissividade (Wells, 2005). Uma outra intenção com relação aos tubos cerâmicos, a cor branca e a forma cilíndrica foram especificadas para refletir a luz



Figuras 28 e 29. Edifício 4 Times Square, em Nova York (1999): vista das fachadas de vidro contendo painéis fotovoltaicos, à esquerda; e vista do edifício em seu local de implantação, à direita (Fonte: Wells, 2005)

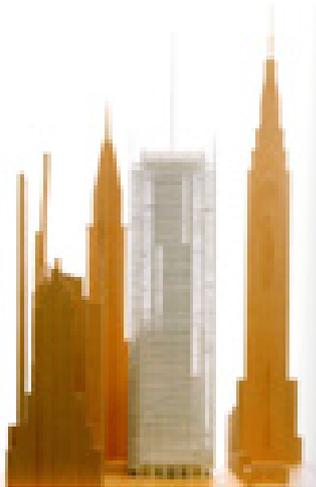


Figura 30. New York Times Building: modelo do edifício inserido na quadra (Fonte: Wells, 2005)



Figura 31. New York Times Building: mock-up de ensaio para avaliação do desempenho luminoso da fachada com brises cerâmicos (Créditos: Vorapat Inkarojrit)

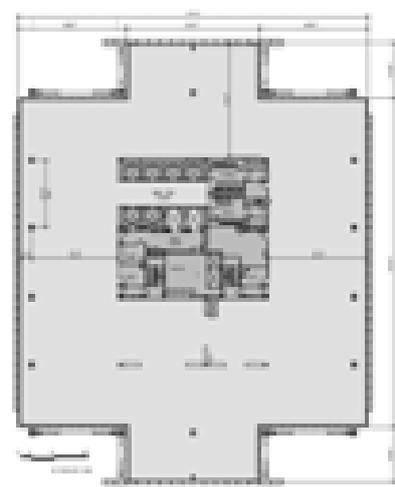


Figura 32. New York Times Building: planta de um pavimento tipo (Fonte: LBNL, 2009)



Figuras 33 e 34. Hearst Tower: vista externa do edifício. Disponível em: <<http://www.hearst.com.tower>>. Acesso em: 03 julho de 2007.

[34] Informação divulgada na página eletrônica do edifício. Disponível em: <<http://www.hearstcorp.com/tower/>>, acesso em: 15 mar 2007.

[35] As categorias mais comuns da certificação LEED são a NC (New Construction) - Novas construções e grandes projetos de renovação, principalmente solicitada para edifícios residenciais; e a CS (Core and Shell) - Projetos da envoltória e parte central do edifício, pleiteada para edifícios comerciais, como o caso das edificações abordadas neste trabalho. Para receber a certificação LEED um edifício deve seguir uma série de critérios, para os quais são atribuídos pontos. De acordo a última versão (até o momento corrente) do manual do LEED CS - LEED 2009 for Core & Shell Development Rating System, a pontuação máxima possível para um edifício na categoria CS é de 100 pontos. Com obtenção de 40 a 49 pontos o edifício já é certificado (certified); de 50 a 59 pontos se obtém a categoria "prata" (silver); entre 60 e 79 pontos a certificação "ouro" (gold), e a partir de 80 pontos, a categoria "platina" (platinum). (Fonte: LEED 2009 for Core & Shell Development Rating System, documento disponível para download na página eletrônica do USGBC: <<http://usgbc.org/>>, acesso em novembro de 2009).

[36] Informação disponível na página do edifício na internet: <<http://www.hearstcorp.com/tower/>>, acesso em: 15 mar 2007.

[37] É um sistema de climatização que aproveita o ar externo quando sua temperatura está abaixo da temperatura interna, para resfriamento do ar no ambiente, consumindo menos energia do que os

natural e aumentar o seu acesso ao interior do edifício, o qual conta com divisórias internas de meia altura.

No entanto, dentre os exemplos de edifícios verificados dessa geração, na cidade de Nova York, aclamados como "sustentáveis", o Hearst Tower (2006) foi divulgado como incluindo a ventilação natural em seu interior<sup>34</sup> (Figura 33).

Abrigando a nova torre do Bank of America, o projeto do escritório de arquitetura internacional Foster and Partners foi o primeiro edifício da cidade a receber a certificação Gold do LEED<sup>35</sup>, a segunda maior possível pelo sistema americano.

De acordo com informações disponíveis na página eletrônica do edifício, o Hearst utilizaria uma estratégia de condicionamento ambiental em modo-misto, com "ventilação natural por até 75% do ano"<sup>36</sup>. Todavia, informações detalhadas a respeito dos sistemas e estratégias ambientais do Hearst não foram divulgadas.

O edifício em questão é conformado por quatro fachadas iguais, compostas por estruturas de aço em *diagrids* e vidros especiais com revestimento de película de baixa emissividade (*low e*). A Figura 34 ilustra um detalhe da fachada do Hearst. Com base no material disponível, verificou-se que o edifício não apresenta aberturas nas fachadas, e acredita-se que a atribuição do termo "modo-misto" estaria vinculada à utilização de ar externo pelo sistema de condicionamento artificial, do tipo *free-cooling*<sup>37</sup>. No entanto, tal fato representa apenas uma característica positiva do sistema de condicionamento ambiental do edifício, e não corresponde à definição desta estratégia de fato, como explicado na introdução deste item do trabalho.

### 1.2.1.2. União Européia

Os edifícios de escritórios europeus ilustram situações muito específicas, direcionadas por normas e regras de construção em áreas determinadas das cidades, principalmente no que se refere à verticalização, isto é, à construção de edifícios altos.

De modo geral, os edifícios apresentam boa relação com a cidade, incluindo projetos de planejamento urbano, considerando impactos na paisagem construída (monumentos históricos) e a ligação com o pedestre.

No cenário de projeto e construção de edifícios de escritórios europeus a partir do final da década de 1990, destacam-se a produção de edifícios na Alemanha, pautada por normas e regulamentações de desempenho térmico e energético; e o poder público de Londres, atuante na aprovação dos projetos a serem construídos.

#### 1.2.1.2.1. Frankfurt, Berlin e Bonn (Alemanha)

A produção de edifícios de escritórios alemães evidencia a existência de uma preocupação em garantir aos ocupantes condições ambientais adequadas ao desenvolvimento de suas atividades.

O país possui regulamentações térmicas e energéticas que são constantemente revisadas e aprimoradas, as quais incluem desde o estabelecimento critérios de transmitância máxima de calor para as fachadas (WsVo 1977, 1982) e de limites para a demanda de aquecimento anual do edifício (ou do consumo de energia para esse fim) (WsVo 1985), considerando a eficiência ou as perdas máximas toleradas para os equipamentos utilizados (EnEV 2002), até a proposição de uma metodologia de avaliação do desempenho térmico anual do edifício com base em simulação termodinâmica (EnEV 2008) (Cunha et al., 2008; Leão et al., 2008). As regulamentações estabelecem, ainda, limites da distância máxima dos postos de trabalho até as fachadas dos edifícios, no intuito de permitir um melhor aproveitamento da luz natural e garantir o acesso aos ocupantes (CIBSE LG10, 1999).

sistemas de condicionamento de ar convencionais.

[38] Parte das informações técnicas sobre o Commerzbank foram obtidas em visita técnica ao edifício sob assessoria de Peter Muschelknautz, gerente de facilidades, realizada em abril de 2004, na cidade de Frankfurt Am Main.

Observem-se as características do clima, o qual apresenta baixa disponibilidade de luz natural ao longo de grande parte do ano (vide item 1.1.2.3), condição que torna ainda mais desafiadora – e ao mesmo tempo desejável – a tarefa de prover níveis adequados de iluminação natural no interior das edificações. Acrescenta-se, ainda, a maior conscientização dos usuários para as questões ambientais e energéticas, inclusive reivindicando um maior acesso aos recursos naturais.

Com plantas mais estreitas (ou distância reduzidas até as fachadas), a incorporação da ventilação natural nos edifícios torna-se, também, mais viável. Desse modo, dentre os exemplos de edifícios elencados na pesquisa, a Alemanha apresenta a maior quantidade de edifícios dispostos em escritórios com incorporação da ventilação natural.

Certamente contribuem para esse fato as condições climáticas (temperatura e umidade) nas cidades alemãs, as quais se apresentam favoráveis à utilização de estratégias passivas de condicionamento ambiental nos edifícios por cerca de 70% do ano (vide item 1.1.2.1).

Esse contexto motivou o desenvolvimento de sistemas e tecnologias, como as fachadas duplas ventiladas ou *double skin façades*, as quais foram extensivamente adotadas em edifícios de escritórios nesse país, notadamente a partir da década de 1980, com argumentos de controle solar e simultânea maximização da iluminação natural, aquecimento solar passivo e proteção acústica, entre outros. O argumento mais utilizado nos anos 2000 foi a possibilidade de ventilação natural do ambiente interno, inclusive nos andares mais altos dos edifícios, submetidos a fortes velocidades e pressões de vento (Marcondes, 2004).

A utilização de fachadas duplas ventiladas se tornou uma forte tendência, com rápida e gradual adoção em edifícios em todo o mundo, com diferentes composições – diferentes tipologias. Essa tendência ainda é verificada, e em alguns casos, acredita-se estar vinculada à busca por uma imagem associativa de alta tecnologia e tecnologia “verde” (Figuras 48, 61 e 70). Um dos ícones da sustentabilidade ambiental aclamado como o primeiro edifício “verde” da década de 1990 é a sede do banco Commerzbank, construída em Frankfurt Am Main em 1998, cidade considerada o centro financeiro da Alemanha (Figuras 35 a 42).

Emblemático, o projeto do escritório de arquitetura Foster & Partners ainda pode ser considerado uma referência válida, pelo caráter inovador de suas soluções, que se mantém atuais, inclusive no que se refere à ventilação natural dos espaços de trabalho. O projeto do edifício objetivou maximizar o uso de estratégias passivas para obtenção de conforto ambiental e eficiência energética. Nesse sentido, o Commerzbank é um dos precedentes da utilização da estratégia de condicionamento ambiental em modo-misto, a qual se mostrou bastante eficiente graças a uma série de fatores, como o projeto arquitetônico diferenciado – forma e organização interna, planta com layout celular, presença de átrio interno com jardim a cada quatro pavimentos e compartimentação de ambientes em vilas verticais de oito pavimentos; a especificação de diferentes fachadas e sua estratégia de operação – podendo ser realizada por usuários conforme aviso de sensores de monitoramento ou automaticamente em situações extremas (Gonçalves, 2003; Visita Técnica, 2004b)<sup>38</sup>.

O sistema de condicionamento em modo-misto do Commerzbank foi estruturado em três fases de operação: 1) primeiramente, ventilação natural via abertura de janelas; 2) forros gelados para arrefecimento e uso de ventilação mecânica; 3) sistema de aquecimento convencional (Ibidem).

A ventilação natural dos espaços internos ocorre pela abertura de janelas nas fachadas, de três diferentes modos. Nos escritórios periféricos, caixilhos de vidros duplos com persianas móveis incorporadas se abrem diretamente para o exterior, contando, ainda, com um painel de vidro simples, externamente, para proteção contra correntes de vento

[39] Sigla para Computer Fluid Dynamics.

[40] Estudos apontam a possibilidade de superaquecimento do ar nas cavidades de fachadas duplas ventiladas, principalmente nos dias mais quentes do verão (Pasquay, 2001; Etheridge & Ford, 2008).

[41] Tipologia de janela “de tombar” (hopper window), comumente encontrada em edifícios europeus.

– cabe enfatizar que não se trata de uma fachada dupla ventilada; os mecanismos empregados são menos complexos (Figuras 41 e 42). Já nos escritórios internos, janelas com vidros simples se abrem para o átrio com jardins (Figuras 35 e 36). A fachada do átrio, por sua vez, possui aberturas que promovem ventilação natural por diferença de pressão, mesmo que não exista vento, do jardim inferior ao jardim superior de cada vila (Figura 40).

Uma mini estação climática está presente em cada vila, monitorando as condições externas, e controlando a possibilidade de abertura das janelas (Visita Técnica, 2004b). Se as condições permitirem, ascende-se uma luz indicativa e o usuário opta pela abertura ou não da janela, sabendo que não haverá suprimento de ar por meios mecânicos. Caso as condições externas não favoreçam a ventilação natural, as aberturas são automaticamente travadas, sem a possibilidade de intervenção do usuário.

Dados do edifício em operação comprovam a utilização da ventilação natural por até 85% do ano, superando as previsões de projeto (Ibidem). Segundo Peter Muschelknautz, gerente de facilidades do Commerzbank, as fachadas e demais estratégias foram fundamentais para o sucesso e o desempenho ambiental do edifício, funcionando com ventilação natural por grande parte do ano, com alguns ambientes operando com condicionamento natural por 100% do tempo, e reduzindo o consumo de energia (Ibidem).

Foram realizadas avaliações de desempenho do edifício com simulações computacionais, prevendo seu comportamento ao longo do ano e direcionando o projeto. As avaliações de desempenho anual contribuíram para o dimensionamento e a especificação das fachadas e suas aberturas, dos sistemas de condicionamento ambiental e auxiliaram a definição das estratégias de operação do edifício nas diversas situações climáticas (do ciclo diário e sazonal) (Ibidem).

Adicionalmente, simulações de dinâmica de fluídos (ou CFD<sup>39</sup>) foram essenciais para a previsão dos processos de ventilação no edifício, tanto horizontalmente, atravessando a planta, quanto verticalmente, passando através dos átrios e jardins (Wells, 2005).

Contemporâneo ao Commerzbank, o edifício Debis House (1999), o qual abriga a sede da “Daimler Benz Inter Services”, exerceu grande influência na arquitetura europeia por indicar uma expansão nas possibilidades projetuais de fachadas para as edificações (Wells, 2005), Figuras 43 a 50.

O projeto do escritório RPBW ocupa uma quadra na Potsdamer Platz, em Berlin, fazendo parte de um extenso plano diretor para revitalização da área, destruída na Segunda Guerra Mundial. O complexo é composto por uma torre de vinte e dois pavimentos e um bloco mais baixo, conformado ao redor de um átrio, prolongando-se até a extremidade oposta do terreno (Figuras 43 e 50).

O edifício foi projetado para funcionar com condicionamento ambiental em modo-misto (LBNL, 2002). No Debis, o acesso de iluminação natural e de ventilação natural é auxiliado pela presença do átrio central e do layout celular dos escritórios (Figuras 45 e 49). As fachadas Oeste e Sul do edifício apresentam uma tipologia complexa de fachada dupla ventilada, evoluída com relação aos primeiros exemplos da década de 1980 (Marcondes, 2004). As fachadas em questão são compostas por painéis móveis na pele externa, como venezianas de vidro, as quais podem se abrir completamente em dias com elevada temperatura para evitar o sobreaquecimento da camada de ar conformada pelas duas peles de vidro<sup>40</sup> (Figuras 44, 47 e 48).

As salas de escritórios voltadas para as fachadas duplas ventiladas podem ser naturalmente ventiladas com a abertura de janelas (de grandes dimensões) presentes na pele interna da fachada dupla, a qual é composta por vidros duplos (Wells, 2005).



Figura 35. Edifício Commerzbank: vista de um escritório voltado para o átrio



Figura 36 e 37. Edifício Commerzbank, em Frankfurt: átrio interno

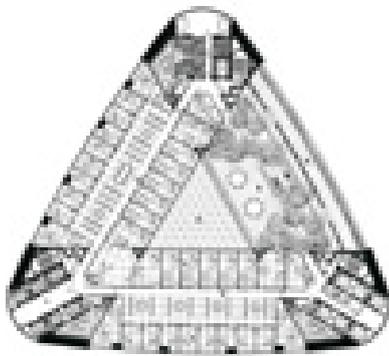


Figura 38. Edifício Commerzbank: planta do pavimento tipo (Créditos: Klaus Bode)

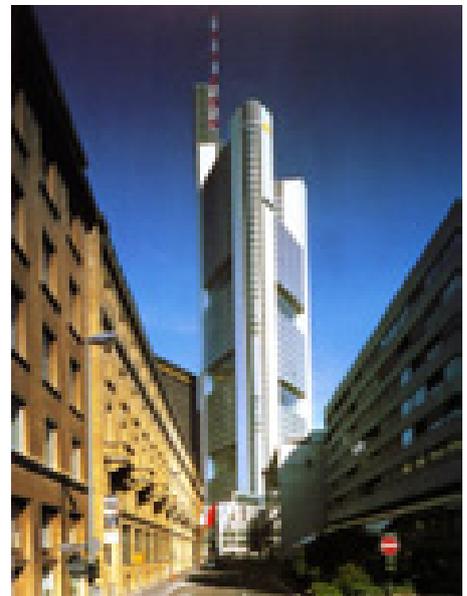


Figura 39. Edifício Commerzbank, em Frankfurt: vista exterior (Fonte: Wells, 2005)



Figura 40. Edifício Commerzbank, em Frankfurt: jardim de uma vila de escritórios



Figuras 41 e 42. Edifício Commerzbank: detalhe da fachada de um escritório periférico, com elementos de proteção solar e esquadrias móveis para ventilação natural



Essas janelas<sup>41</sup> se abrem para dentro dos ambientes, como ilustra a Figura 47.

A presença de duas aberturas em alturas diferentes na mesma fachada permite uma maior flexibilidade e ajuste das condições de ventilação interna na sala. Contribui para a eficiência da ventilação natural, também, a profundidade reduzida das salas de escritórios, com até 6,5 m (LNBL, 2002).

O controle das da pele externa da fachada dupla ventilada e de elementos de proteção solar ajustáveis presentes na cavidade é realizado por um sistema de gerenciamento central (BMS) de acordo com as condições climáticas externas registradas por sensores (LNBL, 2002), de modo semelhante ao Commerzbank.

Com relação às outras partes do edifício, elementos cerâmicos extrudados são dispostos como brise horizontais nas fachadas externas, compostas por vidros duplos (Wells, 2005), Figura 46. Nesses ambientes, a ventilação natural é realizada com a abertura de janelas centrais, como ilustrado na Figura 47. Similarmente ao verificado no edifício New York Times, observa-se o distanciamento entre os elementos de proteção solar, no intuito de permitir vistas “desobstruídas” para o exterior. Já as fachadas voltadas ao átrio central possuem brises em vidro com aplicação de silk screen, seguindo-se o padrão de posicionamento verificado com os elementos cerâmicos. Ventilação cruzada pode acontecer nessas salas com auxílio do átrio, cuja cobertura é composta por painéis de vidro móveis, permitindo a saída do ar (Ibidem).

A estratégia de condicionamento ambiental do Debis conta, ainda, com a presença de tetos frios e sistemas de aquecimento do tipo “district heating” nos escritórios (Ibidem).

Outro edifício de escritórios construído em Berlin merece destaque. Abrigando a parte administrativa da “Gemeinnützige Siedlungs-und Wohnbaugenossenschaft mBH”, o GSW (1999), projetado por Sauerbruch Hutton Architects, é conformado por em uma lâmina estreita, de forma curva, contendo vinte e dois pavimentos (Figura 51).

Orientadas a Leste e a Oeste, as duas principais fachadas do GSW apresentam tipologias completamente distintas, e contribuem para a incorporação de uma série de estratégias passivas de condicionamento ambiental no edifício, incluindo iluminação e ventilação natural dos espaços de trabalho.

A fachada Leste do edifício é dividida em três partes, compreendendo janelas com vidro triplo e persianas móveis incorporadas, venezianas metálicas, e o fechamento opaco. A ventilação natural do ambiente pode ser obtida por meio do acionamento das janelas e/ou da abertura das venezianas (LNBL, 2002); (Figuras 55 e 56).

Do lado oposto do escritório, a fachada Oeste é composta por uma fachada dupla ventilada. Janelas de vidros duplos, são instaladas na pele interna, ao passo que a pele externa é composta por vidros fixos de 10mm. Uma cavidade de 0,9m de espessura é conformada pelas peles de vidro; neste espaço são posicionados brises móveis verticais em alumínio, os quais podem ser ajustados independentemente para cada módulo (Figura 53). A cavidade é selada nas laterais, com aberturas apenas na parte inferior e no topo. Tanto as janelas quanto os brises podem ser operados manualmente, pelos usuários, ou automaticamente, por meio do sistema de gerenciamento (Ibidem).

O teto e o piso dos escritórios apresentam concreto exposto de modo a auxiliar no condicionamento natural dos escritórios (Figura 55).

A estratégia de ventilação foi programada para acontecer com entrada do ar pela fachada Leste (direção predominante de incidência do vento na cidade), atravessando os ambientes que possuem 11m de profundidade, e saindo pela fachada oeste, na qual a cavidade da fachada dupla conecta verticalmente os vinte e dois pavimentos (Ibidem), Figura 54. Desse modo, o fluxo de ar pode acontecer por diferença de pressão



Figura 43. Edifício Debis, em Berlin: vista do edifício, com o bloco alto ao fundo (Fonte: Wells, 2005)



Figura 44. Edifício Debis, em Berlin: vista da fachada dupla ventilada, à esquerda, e da fachada com brises cerâmicos, à direita

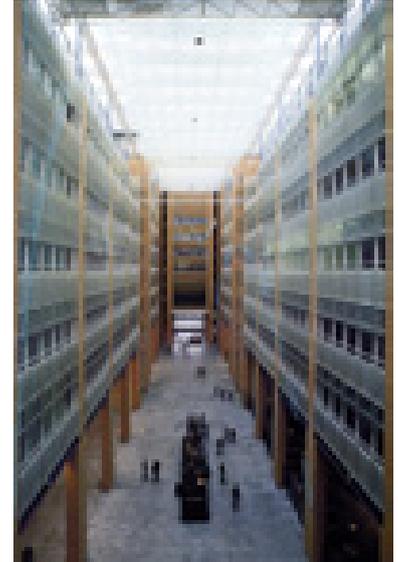


Figura 45. Edifício Debis: átrio interno (Fonte: Wells, 2005),



Figura 46. Edifício Debis: detalhe do brise cerâmico na fachada externa

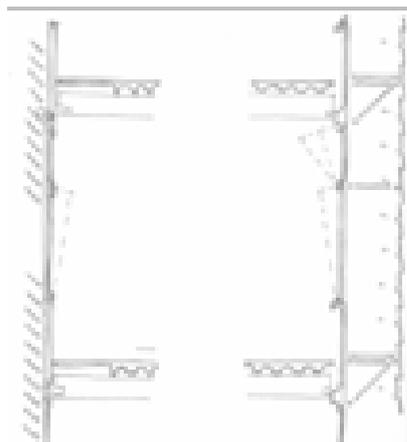


Figura 47. Edifício Debis: croqui esquemático das fachadas simples e dupla, e suas aberturas (Fonte: Wells, 2005)



Figura 48. Edifício Debis, em Berlin: detalhe da fachada dupla ventilada



Figura 49. Edifício Debis, em Berlin: interior de uma sala de escritórios (Fonte: LBNL, 2002)

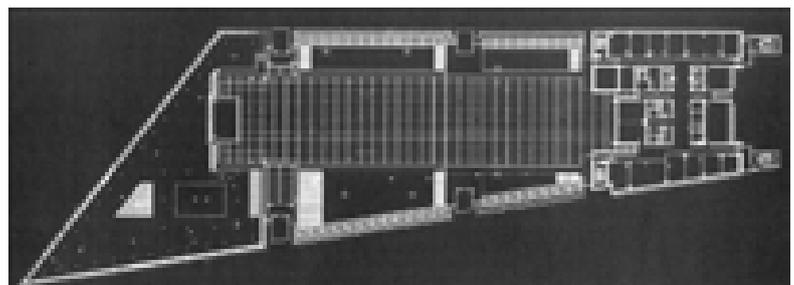


Figura 50. Edifício Debis: planta (Fonte: Wells, 2005)

na cavidade, funcionando como uma chaminé, como ilustra a Figura 52. Nos dias frios, o ar em ascensão na cavidade é reaproveitado por um sistema de recuperação de calor, retornando para a planta central do edifício e, posteriormente, sendo insuflado nos ambientes (Ibidem).

Vale destacar os diferentes dispositivos de proteção solar existentes no edifício, inclusive na mesma fachada, caso da orientação Leste; e o efeito plástico dos brises móveis na fachada oeste, conferindo dinamismo à edificação.

Com relação aos exemplos de edifícios de escritórios na Alemanha na primeira década dos anos 2000, verificou-se que os exemplos que mencionam ventilação natural utilizam a estratégia mista de condicionamento ambiental, seguindo os antecessores Commerzbank, Debis e GSW. Com frequência, esses novos edifícios apresentam fachadas duplas ventiladas, reforçando a tendência local. É o caso do Deutsch Post Office Tower, inaugurado em 2003 na cidade de Bonn - projeto de arquitetura de Murphy Jahn, escritório sediado em Chicago (Figura 58).

Com forma elíptica, a organização do edifício de quarenta andares acontece em torno de átrios chamados de “sky courts”, os quais compartimentam o edifício a cada nove pavimentos, e dividem a planta de escritórios em duas metades (Figura 59). A ventilação natural do edifício acontece principalmente durante a primavera e o outono,



Figura 51. Edifício GSW, em Berlin: vista geral do edifício. (Disponível em: <http://www.sauerbruchhutton.de>. Acesso em: 18 julho 2009.)

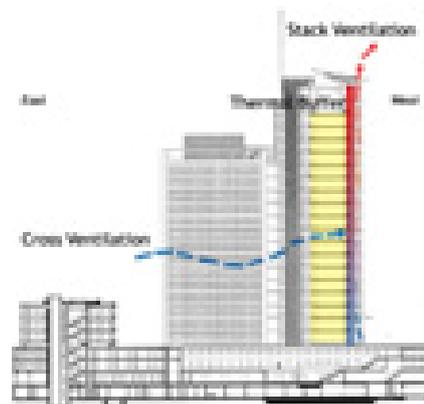


Figura 52. Edifício GSW: corte esquemático evidenciando a estratégia de ventilação natural dos escritórios. (Fonte: LNBL, 2002)



Figura 53. Edifício GSW: brises móveis na cavidade da fachada dupla ventilada (orientada a oeste). (Fonte: LNBL, 2002)

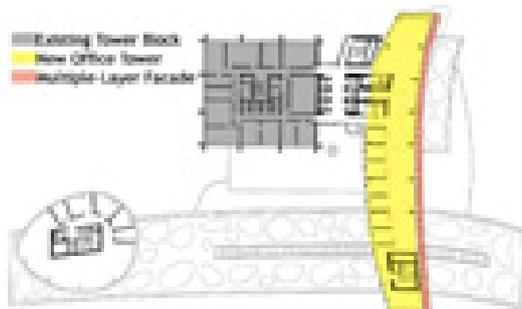


Figura 54. Edifício GSW: planta de um pavimento tipo de escritórios. (Fonte: LNBL, 2002)



Figuras 55 e 56. Edifício GSW: interior de um escritório orientado a leste e vista externa de sua fachada. (Fonte: LNBL, 2002)



com ar externo entrando pelas aberturas existentes na segunda pele da fachada dupla ventilada, passando pela cavidade até atingir a pele interna, acessando os ambientes pelas periferias das plantas, e atravessando-os. O efeito da ventilação é reforçado pela laje de concreto exposta nos escritórios. A saída do ar se dá pelos átrios que se prolongam verticalmente a cada nove pavimentos e funcionam como chaminés de exaustão, possibilitando reaproveitamento de parte do calor (Figura 60). No inverno, o ar externo pode ser pré-aquecido passivamente entre as duas peles de vidro da fachada dupla ventilada antes de entrar no ambiente de escritórios (Etheridge & Ford, 2008).

A divisão do edifício a cada nove pavimentos é realizada para evitar o desenvolvimento de fluxos de ar excessivos por efeito chaminé, os quais poderiam gerar rajadas e fortes pressões de vento (Wells, 2005).

No Deutsch Post, a fachada dupla ventilada é composta, na pele interna, por vidro duplo preenchido com argônio, para aumentar seu isolamento térmico. Para a pele externa utilizou-se apenas uma camada de vidro laminado, o que recebeu tratamento de baixa emissividade (*low-e*) em sua face voltada para a cavidade (Figura 61). A função do tratamento do vidro é “refletir” energia radiante de volta para ao edifício, reduzindo, desse modo, a perda de calor do ambiente (Ibidem).

Observa-se que a segunda pele da fachada dupla ventilada possui diferentes configurações para as orientações Norte e Sul. Na fachada Sul, os painéis de vidro são dispostos com angulação horizontal, apresentando, entre eles painéis móveis de fechamento, conectados por um sistema de automação (Figura 57). O topo das fachadas é aberto, e conta com a presença de ventiladores, os quais auxiliam na exaustão do ar aquecido, quando necessário, além de possibilitar um maior controle dessa parte da fachada, no intuito de prevenir que o ar fique estagnado ou retorne para a cavidade, e evitar a ocorrência de fortes rajadas de vento (Ibidem).

A estratégia de condicionamento em modo-misto do Deutsch Post inclui um sistema convectivo na fachada (*perimeter convector*), que aquece ou resfria o ar externo, quando necessário, para ser insuflado na periferia dos ambientes. Os ocupantes podem abrir janelas que dão para a fachada dupla ventilada a qualquer momento, automaticamente desativando o sistema convectivo (Etheridge & Ford, 2008).

Por não apresentar um sistema central de ventilação de back-up, além de benefícios com economia de energia, tal estratégia de condicionamento possibilitou economia de área, traduzindo-se em grandes benefícios para o edifício alto. A ausência de uma planta de sistema de condicionamento de ar proporcionou ganho de aproximadamente um andar, e a ausência de dutos possibilitou pés direitos menores (distâncias de piso a piso).

Menciona-se a realização de avaliações de desempenho ambiental do edifício durante seu projeto, tanto por meio de simulações computacionais (com a utilização dos softwares TRNSYS para desempenho térmico; FIDAP e COMIS para avaliação de fluxo de ar; RADIANCE para avaliação de iluminação natural), quanto de testes físicos (incluindo testes em túnel de vento e *mock-ups* de dois andares de escritórios incluindo as fachadas duplas ventiladas)<sup>42</sup>.

Contudo, vale ressaltar que nenhum dos quatro edifícios alemães apresentados possui um selo de “edifício verde”.

Tendo em vista a tendência mundial pela atribuição de tais selos, a Associação Alemã para Construção Sustentável (*German Society for Sustainable Building - Die Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen / DGNB*), fundada em 2007, criou o primeiro selo “verde” alemão para avaliação de edifícios: o *German Seal of Approval for Sustainable Building*, o qual estava previsto para entrar em vigor em 2009.

[42] Informações divulgadas pela equipe de engenharia da TRANSSOLAR (climate engineering) e pelos fornecedores dos vidros PILKINGTON em suas páginas eletrônicas. Disponíveis em: <<http://www.transsolar.com>> e <<http://www.pilkington.com/applications/case+studies/2000-4/deutsche+post+tower+bonn+germany.htm>>; acesso em 14 jan 2009.



Figura 57 – Deutsch Post, em Bonn, Alemanha: vista das fachadas norte, à esquerda, e sul, à direita (Fonte: Wells, 2005)



Figura 58. Deutsch Post: vista externa do edifício (Fonte: Wells, 2005)



Figura 59. Deutsch Post; planta do pavimento tipo, mostrando a fachada dupla ventilada e os “sky courts”. (Fonte: Etheridge & Ford, 2008)



Figura 60. Deutsch Post; vista da cidade através do átrio. (Fonte: Etheridge & Ford, 2008)



Figura 61. Deutsch Post, em Bonn, Alemanha: cavidade da fachada dupla ventilada, a norte (Fonte: Wells, 2005)

[43] Informações obtidas até fevereiro de 2009.

#### 1.2.1.2.2. Londres (Inglaterra)

Compreendendo as últimas duas décadas, a cidade de Londres apresenta a produção mais significativa de edifícios de escritórios com apelo ambiental da Inglaterra. Concentrados no distrito financeiro da cidade, a City, um cluster de edifícios altos segue regulamentações específicas para sua construção, com considerações a respeito do impacto no entorno, da relação com o pedestre e com o patrimônio histórico da cidade, apresentadas no “The London Plan” (2004).

Dentre a geração de edifícios de escritórios ingleses que argumentam o desenvolvimento de uma arquitetura voltada ao aprimoramento do desempenho ambiental e energético quatro exemplos principais foram, aqui, destacados, por aclamar a incorporação de ventilação natural. O primeiro deles já se encontra em operação, sendo os demais exemplos mais recentes, ainda em construção<sup>43</sup>, a dizer (Figura 62):

St. Marys Axe / Swiss Re (2004), arquitetura: Foster & Partners

- Leadenhall Street 122, arquitetura: Richard Rogers Partnership
- Bishopsgate Tower /DIFA Tower / The Pinnacle, arquitetura: Kohn, Pedersen & Fox (KPF)
- Heron Tower, arquitetura: Kohn, Pedersen & Fox (KPF)



Figura 62. Vista de Londres simulando os edifícios: Heron Tower, Bishopsgate Tower e Leadenhall Street 122, quando construídos, ao lado do St. Marys Axe (Swiss Re), existente (respectivamente, da esquerda para a direita). (Disponível em: <<http://www.skyscrapernews.com>>. Acesso em: 26 de outubro de 2008)

Com foco nas questões de desempenho ambiental, o edifício construído para ser a sede da Companhia seguradora Swiss Re foi o primeiro exemplo dessa geração de edifícios ingleses projetado para funcionar com uma estratégia de condicionamento ambiental em modo-misto. Em funcionamento desde 2004, este edifício é tido como marco de desempenho ambiental e eficiência energética, destacando-se no Eastern Cluster de Londres por sua forma orgânica e altura - 180m (Figuras 63 a 70). O St. Marys Axe não possui nenhum selo ou certificação de green building, entretanto, seu projeto incluiu a realização de uma série de estudos e avaliações de desempenho ambiental, inclusive com uso de ferramentas avançadas de simulação computacional de termodinâmica e de dinâmica de fluidos, para previsão do desempenho da edificação ao longo do ano, testando e dimensionando soluções projetuais e as estratégias de condicionamento empregadas no projeto (BDSP, 1998; Visita Técnica, 2004a).

Projetado pelo mesmo escritório de arquitetura que concebeu o Commerzbank em 1998, Foster & Partners, o St. Marys Axe apresenta algumas características similares ao edifício antecessor, como a organização dos pavimentos em vilas com átrios internos. Porém, com menor flexibilidade, maior complexidade de elementos para operação de seu sistema de condicionamento ambiental e menor abertura para o exterior. Inclusive as condições climáticas de Frankfurt e Londres são similares, ambas sujeitas a invernos rigorosos e verões amenos, apresentando condições favoráveis ao uso de estratégias passivas nos edifícios por cerca de 70% do ano (vide item 1.1.2). A concepção do edifício, tanto da fachada como dos espaços internos, foi baseada no ambiente de trabalho “climatoffice de Buckminster Fuller dos anos 1970, o qual possuía envoltórias de módulos triangulares e jardins internos (Foster, 2008).

Os argumentos arquitetônicos para a forma inusitada desta torre elíptica, com dupla curvatura e diâmetros variáveis, foram: preocupação de menores interferências nas visuais dos edifícios históricos da cidade, auxiliar no acesso de iluminação natural no interior do edifício e reduzir a aceleração das correntes de vento no espaço urbano

[44] De acordo como Relatório Técnico fornecido pelo engenheiro Klaus Bode, diretor do BDSP Partnership, escritório inglês responsável pelo projeto das estratégias de condicionamento ambiental e pelas avaliações de desempenho do edifício, três configurações foram consideradas para o átrio: 1) totalmente aberto para a área de escritórios, 2) aberto em uma das laterais, e 3) fechado nas laterais, com aberturas controladas (como janelas). A opção 1) resultou na maior contribuição pro aumento da frequência anual de ventilação natural do edifício (BDSP, 1998).

(Visita Técnica, 2004a).

A organização do edifício é feita com agrupamento vertical de seis andares, rotacionados ao longo toda fachada, contando com átrios em forma de espiral e com jardins externos, projetados como espaços de estar, convívio e comunicação visual (Ibidem), Figuras 64, 66 e 70.

As plantas dos pavimentos tipo contam com um *core* de serviços central, e apresentam diâmetros variáveis (Figura 68).

A envoltória totalmente envidraçada da Swiss Ree é argumentada pela intenção de maximizar a transparência do edifício. Os átrios são fechados com vidro duplo de cor escura. Já as fachadas dos escritórios, do tipo fachada dupla ventilada, são estruturadas a partir de uma grelha metálica de dupla curvatura, com módulos triangulares. Esta fachada dupla ventilada é composta por vidro duplo tratado com metalização na pele externa, seguida por uma cavidade ventilada de 15cm, com micro persianas para proteção solar, e vidro simples transparente na pele interna, adjacente aos escritórios (Figura 67). Nota-se que a fachada dos escritórios não abre para o exterior, e sua ventilação é possibilitada pelo contato com o átrio (BDSP, 1998; Visita Técnica, 2004a), Figura 69.

Por meio de um sistema de condicionamento ambiental em modo-misto, a ventilação natural do edifício também foi prevista para acontecer através dos átrios (os quais possuem 9m<sup>2</sup> de aberturas por pavimentos), caso as condições do ar externo estejam dentro da faixa estipulada: entre 5°C e no máximo 24°C (ou 26°C) de temperatura, admitindo umidade relativa máxima de 60%. Fora dessas condições, o sistema de controle (*Building Management System* – BMS) automaticamente ativa ou ventilação mecânica, ou o sistema de condicionamento de ar (Ibidem).

Como citado anteriormente, simulações computacionais foram realizadas para prever o desempenho ambiental do projeto e o funcionamento do edifício, ajustando a estratégia de modo-misto. Destacam-se avaliações da ventilação natural dos átrios e da fachada dupla, com programa de CFD. Como exemplo, foram estudadas diferentes configurações do átrio relacionadas ao layout livre ou celular da planta de escritórios, avaliando-se o impacto resultante no consumo de energia e no uso dos sistemas de condicionamento ambiental<sup>44</sup>.

Os resultados da avaliação de desempenho apresentaram uma previsão de ventilação natural variando entre 40-80% das horas ocupadas do ano, conforme as condições climáticas externas e os níveis de tolerância a serem definidos pelos usuários (por exemplo, com a temperatura interna máxima do ar aceitável passando de 24°C para 26°C, ocorre um acréscimo de 22% no período anual de ventilação natural) (Ibidem).

Ainda a respeito do St. Marys Axe, não foram divulgadas informações de desempenho do edifício em operação. Sabe-se, apenas, que os pavimentos do edifício não ocupados pela Cia. Swiss Ree são disponibilizados para locação no mercado imobiliário, e que alguns átrios estão sendo fechados para ampliar a área útil de escritórios. Esse fato compromete a estratégia de condicionamento ambiental, impossibilitando a ventilação natural no edifício, e tornando necessário o condicionamento artificial por Toto o período de ocupação (Wells, 2005).

Os outros três edifícios destacados, Leadenhall Street 122, Bishopsgate Tower e Heron Tower, por sua vez, são exemplos ainda mais recentes e encontram-se em construção. Todos eles aclamam utilizar uma estratégia de condicionamento ambiental em modo-misto, ambos conformados em torres envidraçadas revestidas por fachadas duplas ventiladas – características, essas, também presentes no antecessor Swiss Ree (Corporation of London, 2008).



Figura 63. Edifício Swiss Re, em Londres: vista do exterior (Créditos: Klaus Bode)



Figura 64. Edifício Swiss Re: esquema conceitual dos átrios (Créditos: Klaus Bode)



Figura 65. Edifício Swiss Re: vista do interior de um pavimento tipo, em direção ao átrio



Figura 66. Edifício Swiss Re: átrio interno visto de seu pavimento superior; nota-se a presença de persianas incorporadas aos vidros das fachadas dos escritórios voltadas ao átrio



Figura 67. Edifício Swiss Re: vista da fachada dupla ventilada em fase final de construção do edifício

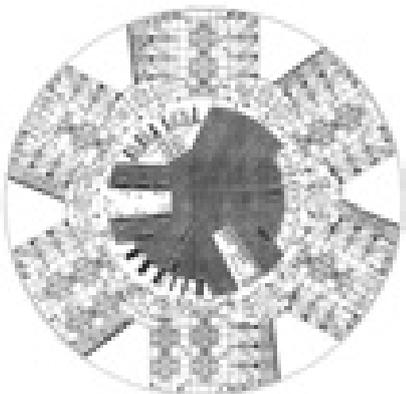


Figura 68. Edifício Swiss Re: planta de um pavimento tipo de escritórios (Créditos: Klaus Bode)



Figura 69 Edifício Swiss Re: aberturas na fachada dos átrios (Créditos: Klaus Bode)



Figura 70. Edifício Swiss Re: átrio interno visto de seu pavimento inferior

[45] A análise dos edifícios foi realizada com base nas informações dos projetos originais submetidos para aprovação disponíveis na página da Corporation of London na internet: <<http://www.cityoflondon.gov.uk>>, acesso em: agosto de 2008.

Esse conjunto de novos edifícios foi projetado numa época em que o processo de aprovação de edificações na prefeitura de Londres tornou-se mais rígido, exigindo, desses, um intenso processo com estudos de impactos ambientais e outras questões de sustentabilidade. A esse respeito, um outro aspecto comum a essa geração é a avaliação de seus edifícios pelo sistema BREEAM - Building Research Establishment Environmental Assessment Method, sendo necessário alcançar uma boa classificação, ou seja, os projetos devem atender no mínimo aos requisitos listados por essa certificação para obter aprovação pelo poder público. (Ibidem)

Com relação à abertura para ventilação natural, a análise desses três novos edifícios evidenciou que não ocorrem períodos de condicionamento natural dos espaços internos<sup>45</sup>. Nesses edifícios, o principal argumento para caracterizar suas estratégias de condicionamento como sendo em modo-misto foi a ventilação natural das fachadas, e não dos ambientes internos.

De acordo com o material de divulgação da Heron Tower, o sistema de condicionamento ambiental conta com uma central para cada vila de três pavimentos, conforme organização espacial do edifício, para insuflamento de ar resfriado ou aquecido nos ambientes de escritórios (Heron Tower, 2008), Figuras 71 e 73. A Figura 72 ilustra a fachada de um escritório e os mecanismos de trocas térmicas; nota-se a inexistência



Figura 71. Edifício Heron Tower, em Londres: vista externa do edifício (Fonte: Wells, 2005)

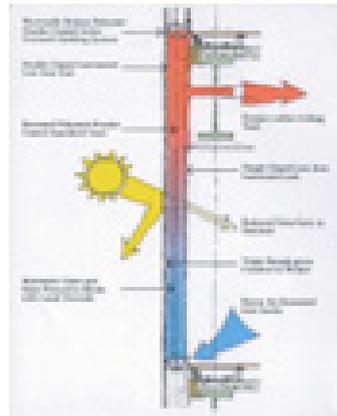


Figura 72. Edifício Heron Tower: corte esquemático da fachada de um escritório (Fonte: Gonçalves, 2003)

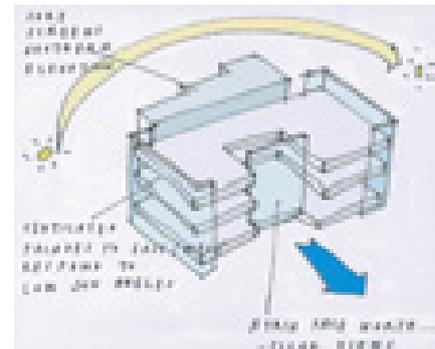
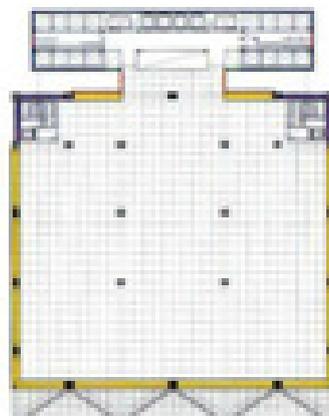


Figura 73. Edifício Heron Tower: perspectiva esquemática de uma vila (Fonte: Gonçalves, 2003)



Figuras 74 e 75. Edifício Leadenhall Street 122, em Londres: planta do pavimento tipo, à esquerda (Fonte: Planning Report PDU/0551/01, 2004); e perspectiva digital do projeto do edifício, à direita (Disponível em: <<http://www.rsh-p.com>>. Acesso em: 02 de abril de 2008)

de janelas operantes para o exterior. Com base nessas características não é possível considerar o sistema de condicionamento ambiental da Heron Tower como sendo em modo-misto.

Similarmente à Heron Tower, no edifício Leadenhall os escritórios não apresentam aberturas diretas para as fachadas duplas ventiladas (isto é, localizadas na primeira pele de vidro) as quais poderiam ser utilizadas pelos ocupantes (Planning Report PDU/0551/01, 2004) (Figuras 74 e 75). O projeto do edifício traz plantas do sistema de condicionamento ambiental no embasamento e na cobertura, contando, ainda, com plantas de ventilação a cada andar, um “sistema mecânico com tomada de ar externo”, definição dos sistemas de *free-cooling*.

Na Bishopsgate Tower, por sua vez, é apontada a utilização de um sistema de climatização composto por forros e vigas gelados complementados por ventilação mecânica (Planning Report PDU/01201/01, 2006).

Um Relatório de Impacto Ambiental contido no projeto original da Bishopsgate enviado à prefeitura para aprovação menciona a existência de janelas operantes nos escritórios, com duas funções: acesso à cavidade da fachada dupla ventilada para manutenção e limpeza, e sua possível operação pelos usuários para entrada de ar “fresco”, como ilustra Figura 78 (Environmental Statement, 2006). Entretanto, a existência de janelas operantes não é enfatizada e nem tampouco mencionada nas fontes de divulgação do edifício acessadas até o momento, e por esse motivo, questiona-se a efetiva presença destes caixilhos no edifício em construção.

Caso exista o real acesso de ar externo no ambiente, diretamente através da abertura de janelas, ou indiretamente, com a captação de ar na cavidade da fachada dupla ventilada e seu transporte para o ambiente interno (sem qualquer processo de resfriamento ou aquecimento ativo), então o sistema de condicionamento ambiental da Bishopsgate poderá ser classificado, de fato, como um sistema de modo-misto.

Em virtude do acima explicitado, optou-se por apresentar o edifício Bishopsgate Tower em maior profundidade neste item do trabalho.

O Bishopsgate Tower ou DIFA Tower, também citado como The Pinnacle, será o edifício mais alto do Eastern Cluster na City, e o segundo mais alto da cidade (Planning Report PDU/01201/01, 2006), Figura 76. Com 63 pavimentos e uma altura de quase 288 metros, o escritório de arquitetura Kohn Pedersen and Fox buscou trazer para Londres um projeto de alta qualidade que consolidasse o Eastern Cluster e se transformasse em um ícone para a cidade. Foram estudados 14 modelos até chegar a sua forma inusitada (Environmental Statement, 2006).

Devido à sua grande altura, a torre sofreu muitas críticas do English Heritage, órgão que regulamenta o patrimônio histórico de Londres, em decorrência do futuro impacto nas principais visuais dos monumentos históricos da cidade, e do impacto previsto no local onde será implantada. Mesmo assim, a implantação do edifício foi justificada pela inserção entre outras torres já aprovadas e construídas, a St. Marys Axe (Swiss Re) e a Torre 42, argumentando-se criar uma harmonia entre todas as torres, estando no centro delas.

A forma orgânica do edifício conta com uma cobertura na base, uma espécie de “saia”, projetada para reduzir impactos de vento no pedestre (Ibidem).

O Bishopsgate será um edifício de uso misto, com 85.313 m<sup>2</sup> de área útil de escritórios. Apresentando *core* de serviços central, os escritórios serão divididos em pavimentos com plantas livres que variam de 2.552 m<sup>2</sup> (4º pavimento) até 450m<sup>2</sup> (54º pavimento). As plantas dos escritórios apresentam profundidades variáveis, sendo as distâncias do *core* central equivalentes a 7,5m na fachada leste, 10,5m na oeste e 13,5m a 15m na

sul (Figura 77) (Ibidem). Vale ressaltar que a questão da profundidade da planta, para o acesso de luz natural nas áreas de ocupação, não é norma na Inglaterra, como é na Alemanha.

Uniformes para todas as orientações do edifício, as fachadas do Bishopsgate acompanham a forma curva da torre, sem utilizar superfícies curvas. As fachadas são compostas por três panos de vidro, sendo um vidro duplo com persianas internas acionadas automaticamente pelo BMS, adjacentes aos escritórios (1ª pele da fachada dupla ventilada), e módulos fixos de vidro simples de 1,5m por 3,85m, desencontrados horizontalmente, conferindo o apelido de “snakeskin” – ou pele de cobra. Os módulos de vidro simples (2ª pele da fachada dupla ventilada) são recuados em relação ao vidro duplo, permitindo passagem de ar (Ibidem).

A respeito da ventilação natural da fachada, não foram obtidos detalhes das aberturas na 2ª pele de vidro, nem tampouco mencionada a possibilidade de controle / fechamento desses vãos, para um controle dessa ventilação. A fachada do topo da torre conta com 90.000 células fotovoltaicas, com capacidade de produzir 200 KW de energia, sendo



Figura 76. Edifício Bishopsgate Tower, em Londres: edifício no contexto urbano (Disponível em: <<http://www.skyscrapernews.com/>>. Acesso em: 26 outubro de 2008)



Figura 77. Edifício Bishopsgate Tower: planta de um pavimento tipo de escritórios (Fonte: Environmental Statement, 2006)

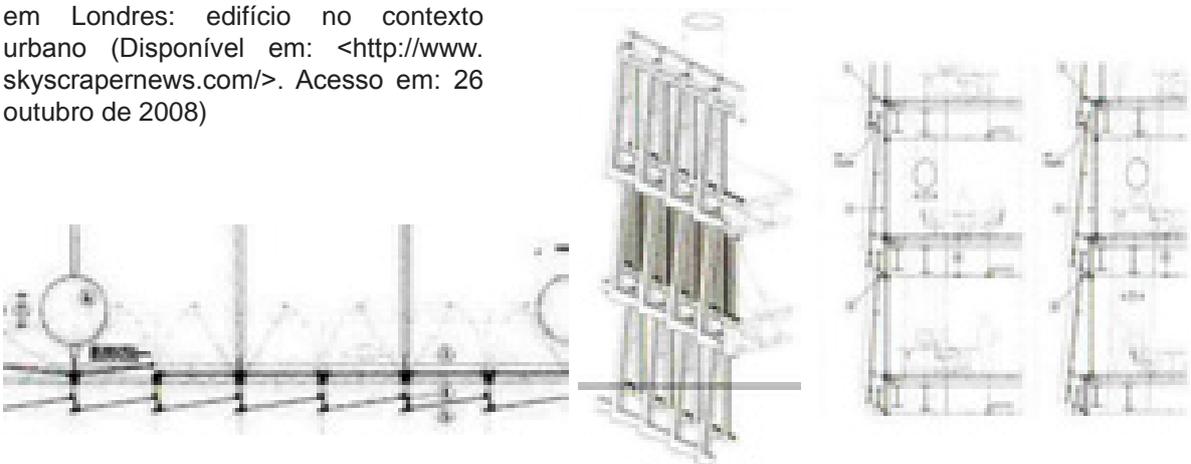


Figura 78. Edifício Bishopsgate Tower, em Londres: corte esquemático, perspectiva e planta dos caixilhos que compõe a fachada dupla ventilada; originais do projeto (Fonte: Environmental Statement, 2006).

[46] O Part L2 é o capítulo da regulamentação dos edifícios ingleses relacionado ao consumo de energia. (Building Regulations, 2000).

possível suprir a demanda de três andares de escritórios, o equivalente a 1,7% de toda energia necessária para o funcionamento do edifício (Ibidem).

Adicionalmente, dentre os artifícios relacionados à maior sustentabilidade e eficiência energética do edifício, são mencionados: 10% da demanda de energia para aquecimento da torre pretende ser obtida de um combustível líquido feito a partir de biomassa; prevê-se que o uso desse combustível natural e dos painéis fotovoltaicos irá reduzir a emissão de CO<sub>2</sub> em 14 e 57 toneladas por ano, respectivamente; o total de emissões de carbono está previsto para ser 8% menor do que o estipulado no Part L2<sup>46</sup> do Building Regulation de Londres (Ibidem; Umakoshi, 2008).

O projeto do Bishopsgate atingiu excelente pontuação no sistema de avaliação de edifícios ingleses, o BREEHAM, e está sendo muito comentado na mídia internacional como um ícone da geração de edifícios de maior desempenho ambiental na cidade e na Europa.

Finalmente, a respeito da nova geração de edifícios de escritórios em Londres, com a aprovação de alguns deles mesmo após a constatação de que suas construções causariam impactos no entorno e/ou interferências nas visuais dos monumentos históricos (caso da Bishopsgate Tower), pode-se dizer que existe um desejo do poder público pela verticalidade na cidade. A presença das torres é vista como simbologia de uma intenção de reafirmar em Londres uma imagem global, tanto de sua arquitetura quanto de sua economia.

### 1.2.1.3. Sydney e Melbourne (Austrália), e Tokyo (Japão)

Adicionalmente aos Estados Unidos e aos países Europeus, edifícios com apelo ambiental e energético também estão sendo previstos e construídos em outros contextos, com condições urbanas, econômicas, sociais, culturais e climáticas diferentes.

Em comparação aos edifícios já mencionados (norte-americanos e europeus), foram identificados exemplos com maior liberdade arquitetônica em relação ao modelo comercial internacional de edifícios de escritórios, e a experimentação de novas soluções de projeto. Com esse enfoque, são comentados dois cenários distintos, as cidades australianas de Sydney e Melbourne, e a cidade japonesa Tokyo, destacando três exemplos de edifícios dessa nova geração já em funcionamento.

#### 1.2.1.3.1. Sydney e Melbourne (Austrália)

Tradicionalmente, a Austrália já é reconhecida por produzir uma arquitetura com forte relação ao contexto local, principalmente às condicionantes climáticas.

Mais especificamente no que tange os edifícios de escritórios em busca de um desempenho ambiental aprimorado e eficiência energética, a incorporação de ventilação natural aparece em exemplos de edifícios altos do final da década de 1990, como o Aurora Place, em Sydney, e sua fachada dupla ventilada (Figura 79).

A torre construída em 1999, projeto arquitetônico do escritório RPBW, possui uma tipologia de fachada dupla ventilada similar àquela presente no edifício Debis em Berlin. Esta fachada dupla ventilada se destaca por sua flexibilidade e adaptabilidade, principalmente em função do clima local mas também possibilitando um maior controle e eficiência da ventilação natural, tanto na cavidade da fachada, quanto no ambiente interno.

Com relação às condições climáticas de Sydney, a análise realizada aponta a ocorrência tanto de dias com elevadas temperaturas do ar, quanto de dias frios, o que gera diferentes demandas para o conforto dos ocupantes e para o desempenho

ambiental da edificação. No entanto, indicam condições amenas por mais da metade do ano, mostrando-se favoráveis à utilização de estratégias passivas para obtenção de conforto térmico no edifício por até 93% do ano (item 1.1.2.1).

O Aurora Place é um dos edifícios pioneiros na Austrália a funcionar com uma estratégia de condicionamento ambiental em modo-misto. Nesse exemplo, a fachada dupla é um dos principais elementos da estratégia de condicionamento: mais flexível, a fachada dupla ventilada possui aberturas variáveis e controláveis nas duas peles de vidro, tanto a interna, adjacente ao ambiente ocupado, quanto a voltada para o exterior, a qual pode se abrir totalmente em dias muito quentes para evitar um sobre aquecimento do ar na cavidade – fato já ocorrido em alguns edifícios monitorados (Pasquay, 2001; Ford, 2008), (Figura 80). Tais características são similares aos exemplos recentes alemães mencionados, e adversas aos exemplos ingleses citados, cujas fachadas não apresentam extensivas aberturas para o ambiente interno, e possuem aberturas externas fixas, conferindo menor controlabilidade, mas, em contrapartida, menor complexidade de operação, manutenção e custos.

As duas fachadas principais do Aurora Place são diferenciadas conforme a orientação. A fachada dupla ventilada é aplicada a norte, e a fachada sul apresenta vidro laminado serigrafado com círculos brancos cerâmicos, auxiliando no controle solar. (Cabe lembrar que a orientação sul é a que recebe menor radiação solar neste clima).

Dentre os edifícios de escritórios australianos dos anos 2000, um exemplo se destaca por seu caráter inovador, empregando novas e criativas soluções, experimentando,



Figura 79. Edifício Aurora Place, em Sydney: implantação do edifício no contexto urbano (Fonte: Marcondes, 2004)



Figura 80. Edifício Aurora Place: detalhe da fachada dupla ventilada com a segunda pele aberta (Fonte: Marcondes, 2004)

com o argumento de promover sustentabilidade ambiental e qualidade do espaço de trabalho, e objetivando influenciar a nova era de projetos de arquitetura de escritórios (Morris-Nunn, 2007).

O edifício CH2 – Council House 2, abriga a prefeitura de Melbourne, e já está operando desde 2007. Para o projeto desse edifício, a equipe da Designinc se baseou no conceito de *biomimicry*, considerando a “arquitetura como expressão direta e honesta das relações biodinâmicas que a natureza usa em seus próprios projetos” (tradução livre da autora) (Ibidem). Essa intenção refletiu na forma arquitetônica e na engenharia sofisticada empregada no CH2, Figura 81.

O edifício de formato retangular possui dez pavimentos tipo. Marcantes, as quatro

fachadas do CH2 receberam tratamentos diferenciados, sendo que a norte, a leste e a oeste apresentam proteção solar extensiva. Brises móveis de madeira reciclada cobrem toda a fachada oeste, pivotando verticalmente com controle automático de acordo com a hora do dia e o ângulo de incidência solar (Corney, 2003b). A fachada norte possui varandas com vegetação, e a fachada leste, chapas metálicas perfuradas, como ilustram as Figuras 82, 83 e 84.

Os elevadores e serviços do edifício foram situados nas laterais leste e principalmente oeste, estrategicamente, para proteger os escritórios da maior incidência de radiação solar direta desta orientação, além de permitir a planta livre no espaço de trabalho (Jones, 2008), Figura 88.

O condicionamento ambiental dos escritórios é feito com uma estratégia de modo-misto, a qual alia estratégias passivas a sistemas ativos de menor consumo energético do que um sistema de condicionamento de ar convencional (Tan, 2004). A estratégia de modo-misto mostra-se adequada às condições climáticas de Melbourne, as quais são similares às da cidade de Sydney.

A ventilação natural nos espaços de trabalho acontece de forma indireta, com ar externo insuflado pelo piso, com controle de saída pelos usuários. O ar entra por baixo, circula no ambiente por diferença de pressão e sai através de aberturas no forro, plenuns de exaustão e shafts na fachada norte (EKA, 2003), Figura 85. Não ocorre re-circulação do ar, o qual é renovado a cada meia hora. A ventilação natural também acontece no período noturno e nos finais de semana auxiliando no resfriamento das superfícies massivas de concreto expostas no ambiente interno, no piso e no forro. Adicionalmente, a estratégia de condicionamento ambiental do edifício conta com tetos e vigas frias para resfriamento dos escritórios nos dias mais quentes do verão, acionados pelo BMS, quando necessário. No inverno, um sistema de aquecimento convectivo é acionado pelo piso, e ventiladores mecânicos auxiliam a circulação do ar no ambiente (Morris-Nunn, 2007).

O espaço de trabalho possui pé direito livre variando de 2,5 m a 3,35 m<sup>47</sup>, em função do forro de concreto ondulado. Essa configuração aumenta a superfície de exposição dos tetos frios e do material com inércia térmica. Apresentando planta retangular de aproximadamente 53 m x 20 m, e com a extensiva proteção solar das fachadas, os níveis de iluminação natural no interior dos escritórios resultam mais baixos, porém, é argumentado um bom aproveitamento da luz que acessa o ambiente, já filtrada pelos elementos externos (Corney, 2003b), Figura 88. A iluminação artificial é feita com lâmpadas T5, de maior eficiência, com acionamento por zona e em função de sensores de iluminação natural. Complementarmente, as mesas de trabalho contam com iluminação artificial individual (Ibidem)(Figura 86).

O CH2 ainda conta com uma série de dispositivos relacionados à eficiência energética como painéis fotovoltaicos (os quais produzem a energia para o acionamento dos brises de madeira), seis turbinas eólicas na cobertura, uma planta de cogeração a gás, coletores solares para o aquecimento de água e “shower towers” (Corney, 2003<sup>a</sup>). Considerada a estratégia mais inovadora do edifício, as “shower towers” promovem resfriamento passivo de água para as vigas frias e a ventilação dos espaços comerciais localizados térreo (Ibidem) (Figura 87).

O Council House 2 recebeu a pontuação máxima no “Australia’s Green Star Environmental Accreditation Rating”, com a obtenção de 6 estrelas (City of Melbourne, 2008). Para tanto, o projeto compreendeu a realização diversos estudos de avaliação de desempenho do edifício para teste e escolha das estratégias a serem empregadas, e para o dimensionamento de tantos elementos presentes nesse conjunto. Foram utilizadas diversas ferramentas de simulação computacional para avaliações de desempenho térmico, incluindo o impacto dos tetos e vigas frias (com o programa TAS, Edsl); de ventilação natural (com o programa de CFD Phoenix); desempenho luminoso

[47] Medidas deduzidas da planta disponibilizada para download na página eletrônica da Prefeitura de Melbourne (City of Melbourne, 2008).

(com o software Radiance) e eficiência energética, entre outros (EKA, 2003; Corney, 2003b; Tan, 2004). Alguns relatórios de avaliação de desempenho do edifício na fase de projeto são disponibilizados para acesso público na página eletrônica da prefeitura de Melbourne (City of Melbourne, 2008).



Figura 81. Edifício CH2, em Melbourne: vista do edifício no contexto urbano (Fonte: City of Melbourne, 2008)



Figura 82. Edifício CH2: brises de madeira pivotantes na fachada Oeste (Fonte: City of Melbourne, 2008)



Figura 83. Edifício CH2: varandas com vegetação na fachada Norte (Fonte: City of Melbourne, 2008)



Figura 84. Edifício CH2: painéis metálicos perfurados na fachada Leste (Fonte: City of Melbourne, 2008)

Figura 85. Edifício CH2: seção com estratégias bioclimáticas (Fonte: City of Melbourne, 2008)

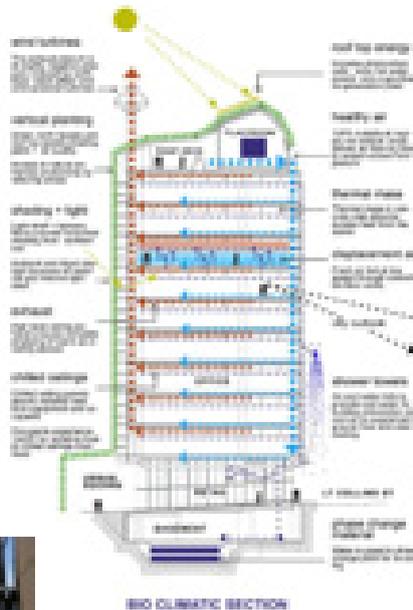


Figura 86. Edifício CH2: interior de um ambiente de escritórios, com forro de concreto ondulado, exposto (Fonte: City of Melbourne, 2008)



Figura 87. Edifício CH2: "shower towers" presentes na fachada Sul (Fonte: City of Melbourne, 2008)

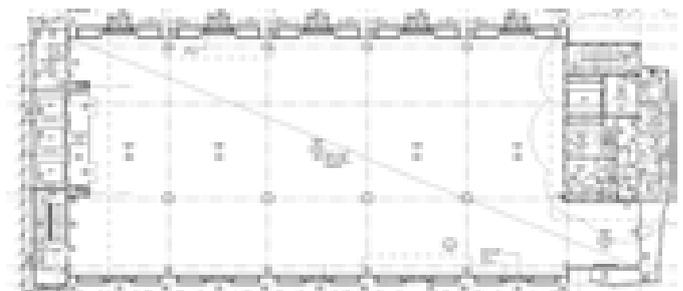


Figura 88. Edifício CH2: planta do pavimento tipo de escritórios (Fonte: City of Melbourne, 2008)

Adicionalmente, o edifício está sendo monitorado desde sua inauguração, o que viabiliza confrontar e/ou comprovar as previsões de projeto (Ibidem).

A respeito do sistema de condicionamento ambiental, os resultados do edifício em operação indicam que o CH2 vem sendo adequadamente arrefecido com o ar “fresco” incidente aliado ao efeito do concreto exposto no forro dos ambientes, e que os tetos e as vigas frios foram acionados pelo BMS (Paevere, 2008). Com relação aos desempenhos energéticos, os dados indicaram uma produção de 60 kW de energia elétrica pela planta de cogeração a gás produz, suprimindo 40% da demanda do edifício; a geração de aproximadamente 3,5 kW de energia elétrica pelos 26 m<sup>2</sup> de painéis fotovoltaicos, para mover os brises de madeira; a provisão de 60% da água aquecida usada no edifício pelos 48 m<sup>2</sup> de painéis solares na cobertura (Corney, 2003a).

De acordo com os dados divulgados, comparado ao edifício antecessor, Council House 1, o consumo elétrico foi reduzido em 85% e o consumo de gás em 87%, emitindo 64% menos CO<sub>2</sub> (Tan, 2004; Jones, 2008). Enfatizando aspectos de qualidade no espaço de trabalho, um estudo de avaliação pós-ocupação realizado no CH2 indica um aumento da satisfação dos usuários, o que estaria gerando uma economia de US\$ 1,12 milhões por ano apenas pela redução de despesas por problemas de saúde e o aumento do bem-estar (Paevere, 2008).

Finalmente, de acordo com a prefeitura de Melbourne, o payback de todos os artifícios ambientais, inclusive com os painéis fotovoltaicos, está previsto em até dez anos (City of Melbourne, 2008).

#### 1.2.1.3.1. Tokyo (Japão)

No contexto japonês, do mesmo modo que na Austrália, selecionou-se um edifício dessa geração que se mostra como alternativa aos princípios da arquitetura comercial.

A Shiodome Tower, construída em Tokyo em 2003, é um edifício de uso misto com escritórios e hotéis nos andares mais altos. Em contraposição ao CH2 em Melbourne, de porte médio, o edifício japonês, projeto da Kajima Corporation, apresenta 38 andares (WGBC, 2007)(Figura 89).

As plantas dos pavimentos tipo do edifício são retangulares, com pé direito interno de 2,8m, tanto para os escritórios, quanto para os andares do hotel. Os escritórios, situados nos andares mais baixos do edifício, são conformados em vilas de dois pavimentos, contendo dois escritórios com mezanino e um átrio com jardim comum, de pé direito duplo, conforme ilustra a Figura 90. O átrio projetado para possibilitar um maior acesso de iluminação natural nos ambientes de trabalho, além de conformar uma área de lazer e convívio para os ocupantes (Ibidem).

As fachadas principais do Shiodome possuem wwr reduzido, sendo conformadas por vidros duplos de baixa emissividade e painéis cerâmicos, os quais, por sua vez, reduzem a incidência de radiação solar direta no interior do edifício (Ibidem).

O condicionamento ambiental dos escritórios é realizado através de um sistema híbrido de ventilação, ou modo-misto, que alterna ventilação natural e condicionamento do ar para aquecimento e resfriamento do ar, conforme as demandas climáticas locais. A ventilação natural é feita de modo indireto, sendo captada por aberturas nas fachadas e direcionada ao ambiente interno por aberturas no forro metálico e no piso. Para o modo ativo, as saídas do sistema de condicionamento de ar são variáveis, acontecendo pelo piso para aquecimento, e pelo forro para resfriamento, como representado na Figura 91 e na Figura 92 (Ibidem).

Atenta-se para a variabilidade nas condições do clima externo de Tokyo ao longo do ano. De acordo com o diagnóstico climático realizado no capítulo 1, diante da ocorrência



Figuras 89 e 90. Shiodome Tower, em Tokyo: vista externa do edifício, à esquerda, e interior de uma vila de escritórios com jardim interno, à direita (Fonte: WGBC, 2007)

Figura 91. Shiodome Tower: esquemas ilustrativos da estratégia de condicionamento ambiental em modo-misto para os escritórios (Fonte: WGBC, 2007)

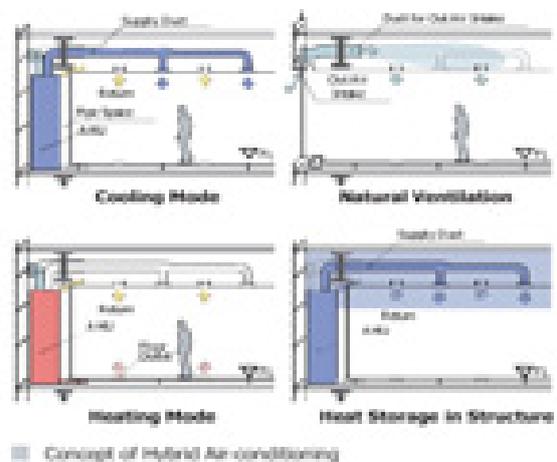
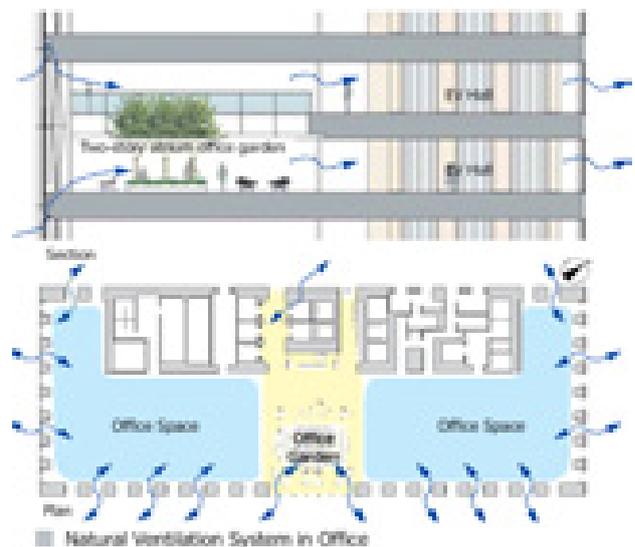


Figura 92. Shiodome Tower, em Tokyo: esquemas ilustrativos da estratégia de ventilação natural dos escritórios, em corte e em planta (Fonte: WGBC, 2007)



de períodos rigorosos tanto de verão quanto de inverno, o uso de condicionamento artificial é recomendado para proporcionar condições de conforto térmico aos usuários por partes do ano, similarmente às condições verificadas para a cidade de Nova York.

O edifício inclui outros aspectos ligados a uma maior sustentabilidade, como o gerenciamento de água, a captação de água da chuva e tratamento e reuso de águas cinzas (Ibidem).

A Shiodome Tower obteve o “Comprehensive Assessment System for Building Environmental Efficiency” - CASBEE, certificado de eficiência energética e sustentabilidade japonês. De acordo com o relatório de análise de desempenho do CASBEE disponível, a pontuação final do edifício foi 3,6 de um total de 5 (Ibidem).

## 1.3. Contexto Local

Neste item comenta-se a arquitetura de exemplos de edifícios de escritórios brasileiros projetados e/ou construídos a partir de 2005 que argumentam a preocupação com questões ambientais, energéticas e de sustentabilidade em seus projetos, tema que vem adquirindo importância crescente no cenário nacional.

No intuito de contextualizar esses exemplos e compreender o processo evolutivo da incorporação de tais questões, uma retrospectiva e breve histórico dos edifícios de escritórios no Brasil foi realizada, destacando as características arquitetônicas, padrões de ocupação e estratégias de condicionamento ambiental dos exemplos de cada geração.

### 1.3.1. Precedentes e evolução da tipologia no Brasil

A maior ocorrência de edifícios de escritórios no Brasil se dá nas cidades de São Paulo, Rio de Janeiro e seus arredores, por constituírem centros econômicos e populacionais. Mas destaca-se notoriamente a concentração de exemplos em São Paulo (Gonçalves, 2003; Marcondes, 2004; Andrade, 2005) e sua representatividade, principalmente no que se refere ao argumento de introdução de questões ambientais e energéticas em sua arquitetura.

No contexto brasileiro e até latino-americano, São Paulo aparece como a cidade mais desenvolvida em termos demográficos e econômicos, concentrando recursos, empresas e pessoas. Esses fatores ajudaram a impulsionar a ocorrência de uma aglomeração de edifícios de escritórios em diversas partes da cidade a partir da década de 1970 (Marcondes, 2004).

Com relação à arquitetura e operação desses edifícios, inicialmente o projeto incluía janelas nas fachadas, possibilitando que os ambientes tirassem partido da ventilação natural. Exemplos de edifícios das décadas de 1930 a 1960, aproximadamente, evidenciavam preocupações de adequação climática e conforto dos usuários, com a utilização de janelas e de outros dispositivos, como os “cobogós” ou elementos vazados, no intuito de aprimorar a permeabilidade do edifício à ventilação natural; elementos de controle solar como o *brise-soleil*; e a presença de materiais com inércia térmica expostos, principalmente com o uso de concreto aparente e alvenaria – características, essas, típicas do início da arquitetura moderna brasileira (Marcondes, 2004), Figuras 93 e 94. A configuração das plantas desses edifícios era celular, isto é, os escritórios apresentavam divisão em salas, conformando espaços menores que possibilitavam um maior controle das condições ambientais, tirando partido da ventilação e da iluminação natural.

A evolução das tipologias de edifícios de escritórios brasileiros evidencia um distanciamento das preocupações com o desempenho térmico e com o conforto térmico dos usuários, apresentando inúmeras mudanças na configuração dos edifícios num período de aproximadamente 30 anos (Romero et al, 1999).

Na cidade de São Paulo, a adoção dos modelos de edifícios altos norte-americanos na década de 1980 marca o início de uma tendência em se reproduzir modelos estrangeiros de edifícios de escritórios (Gonçalves, 2003). Desse modo, os edifícios de escritórios passaram a apresentar plantas progressivamente mais profundas, fachadas do tipo “cortina de vidro” seladas<sup>48</sup>, e wvrs de até 100%<sup>49</sup>. Quanto à iluminação natural

[48] As fachadas incluem apenas pequenas aberturas conforme exigência do Corpo de Bombeiros para segurança contra incêndio e/ou aberturas para manutenção.

[49] Considerado pela parte externa da fachada.

dos ambientes de trabalho, a ausência de um controle solar adequado na envoltória dos edifícios levou à adoção generalizada de persianas internas, em substituição aos elementos externos anteriormente empregados. Os edifícios passaram a operar com sistemas de condicionamento e iluminação artificial por quase todo o período de ocupação, com conseqüências diretas na eficiência energética. Dados desses edifícios indicam que cerca de 70% do consumo de energia final é atribuída aos sistemas de sistema de condicionamento de ar e iluminação artificial (Romero et al. 1999; Gonçalves & Romero, 2001).

Cabe ressaltar que 86,6% da energia consumida pelo setor comercial no Brasil é elétrica, sendo 84,5% advinda de fontes renováveis e, portanto, com reduzida emissão de CO<sub>2</sub> em comparação a outros países no contexto internacional (vide Introdução). Sendo assim, pode-se dizer que a questão energética para os edifícios de escritórios brasileiros está mais vinculada à redução do consumo e ao direcionamento para ampliar a utilização de recursos renováveis, especialmente considerando-se o potencial de utilização da energia solar (vide item 1.1.2.3).

A busca por uma imagem arquitetônica internacional de edifícios altos visando estabelecer um marco geopolítico internacional em São Paulo aconteceu simultaneamente à abertura do mercado brasileiro na década de 1990, resultando na presença de edifícios cujos projetos foram desenvolvidos quase que integralmente por escritórios de arquitetura e engenharia estrangeiros (Goncalves, 2003). Seguindo tal padrão, os exemplos de edifícios de escritórios da década de 1990 continuaram selados, não apresentando janelas operantes e funcionando sob condicionamento artificial. As inovações dos edifícios dessa geração estão vinculadas ao uso de sistemas e tecnologias. Os serviços foram concentrados no centro de plantas com *layout* livre, em sua maioria, com formas retangulares ou quadradas, e apresentando áreas de piso totais dos pavimentos tipo de escritórios variando desde 600m<sup>2</sup> até cerca de 2.200m<sup>2</sup> (Gonçalves & Romero, 2001; Marcondes, 2004).

Um dos exemplos de edifícios “importados” é o Birmann 21, projetado pelo escritório Skidmore, Owings & Merrill (S.O.M.) em 1998, e construído na Av. Nações Unidas, em frente à Marginal do Rio Pinheiros, Figura 95. Estudos realizados por Romero (1999) mostraram dificuldades para realização de um controle ambiental eficiente nesse edifício, o qual é artificialmente condicionado, devido principalmente a sua orientação e à presença de uma fachada totalmente envidraçada.

No início dos anos 2000, um outro edifício projetado pelo S.O.M. é divulgado na mídia como sendo o primeiro “edifício verde” do país (Marcondes, 2004). Inaugurado em 2002, também na Av. Nações Unidas, o edifício que abrigava o Bank Boston (Figura 96) possui vidros duplos com alto grau de transparência em suas fachadas, sem elementos de proteção solar externos, seguindo padrão de edifícios do norte europeu, nos quais a disponibilidade de luz natural é mais baixa do que as condições brasileiras e o isolamento térmico é necessário para evitar perda de calor interno nos períodos frios. No contexto de São Paulo, o qual apresenta alta disponibilidade de luz no céu (com cerca de 10.000 lux por 80% do tempo, como apresentado no item 1.1.2.3, o impacto de tal fachada foi relatado por usuários do edifício, os quais argumentaram sofrer desconforto visual nos ambientes de trabalho devido à ocorrência de reflexos nos monitores de vídeo e ofuscamento (Andrade, 2005).

Um levantamento realizado por Andrade (2005)<sup>50</sup> no ano de 2002 indicou que, com relação à altura dos edifícios na cidade de São Paulo, 39% apresentavam porte médio (de 5 a 15 pavimentos) e 39% eram considerados altos (com mais de 15 pavimentos). Já a respeito do tamanho do pavimento tipo, 58% apresentavam área útil de 500 a 1.000 m<sup>2</sup>, e 39% dos casos possuíam áreas maiores.



Figura 93. Edifício Plavinil-Elclor na Av. Paulista, em São Paulo (projeto arquitetônico de Rino Levi com colaboração de Paulo Bruna, 1961)



Figura 94. Edifício Copan, em São Paulo. (projeto da década de 1950 de Oscar Niemeyer com colaboração de Carlos Lemos)



Figura 95. Edifício Birmann 21 em São Paulo; projeto SOM, 1998 (Créditos: Gonçalves, 2003)



Figura 96. Edifício Bank Boston, em São Paulo; projeto SOM, 2002 (Créditos: Steinkamp/ Ballogg)

[50] A autora realizou uma avaliação quantitativa do perfil de ocupação de edifícios de escritórios brasileiros em 2002, sendo trinta e dois exemplos localizados na cidade de São Paulo (Andrade, 2005).

[51] A má qualidade do ar interno dos edifícios passou a ser conhecida mundialmente como a "Síndrome dos Edifícios Doentes", terminologia criada em 1983 pela Organização Mundial de Saúde (OMS). Tal síndrome seria o resultado de uma conjunção de fatores que vão desde os problemas no projeto até a má conservação dos dutos do sistema de condicionamento de ar, causando dois tipos básicos de contaminação: a biológica por fungos, bactérias, vírus e protozoários e até mesmo aracnídeos como é o caso dos ácaros, e a química proveniente de gases liberados por produtos de limpeza, vernizes, tintas, equipamentos de escritório, colas, aumento no nível de dióxido de carbono, etc. (Teixeira et al., 2005)

[52] Considerações a respeito da ventilação natural dos edifícios em São Paulo com relação à qualidade do ar e ruído externos são realizadas nas Considerações Finais deste capítulo.

Essa pesquisa apontou, também, que 97% dos edifícios de escritórios em São Paulo funcionavam com sistemas de resfriamento do ar durante o período de ocupação, incluindo desde exemplos recém construídos na cidade na época em questão até exemplos mais antigos que ainda apresentavam janelas operantes. Menciona-se o edifício Martinelli construído em 1929 e que atualmente abriga algumas secretarias da prefeitura de São Paulo.

Os argumentos apresentados para o uso do sistema de condicionamento de ar são frequentemente relacionadas ao tipo de atividade desenvolvida, com alta geração de cargas térmicas pelas pessoas, equipamentos e iluminação artificial; e ao clima externo, com a ocorrência de altas temperaturas durante partes do ano, principalmente nos dias mais quentes do verão, além de problemas relativos à qualidade do ar e ruído - crescentes em determinados pontos da cidade (Gonçalves, 2003; Marcondes, 2004).

[53] Os dados apresentados neste item foram coletados até o início de 2008, anterior a da crise econômica mundial que ocorreu entre 2008 e 2009.

[54] Isto significa que dos 2,3 milhões de m<sup>2</sup> existentes na cidade, apenas 160 mil m<sup>2</sup> estão disponíveis para locação. De acordo com especialistas da consultoria imobiliária Jones Lang La Salle, a taxa de vacância máxima foi de 24% em 2003 e 2004. Para não inflacionar os preços e permitir mobilidade às empresas a taxa em São Paulo deve estar entre 10%-15% (Capuchinho, 2008).

[55] Conforme levantamento realizado pela consultoria imobiliária Cushman & Wakefield (Abbati, 2008)

Soma-se aos pontos levantados a "falsa segurança" vinculada à idéia de controle das condições internas pelo sistema de condicionamento de ar, o qual propicia a manutenção de condições ambientais constantes durante o período de ocupação ao longo do ano, independentemente das variações climáticas externas e até na ocupação interna. No entanto, o controle extremo das condições internas por meio do uso de sistemas prediais de condicionamento ambiental não necessariamente significa obtenção de conforto para seus usuários, e implica em outras questões, como o bem estar e a produtividade dos ocupantes, e a qualidade do ar interno (Andrade, 2005). Problemas relativos à qualidade do ar nesse tipo de edifício levou à criação do termo "Síndrome dos Edifícios Doentes"<sup>51</sup> (Teixeira et al., 2005).

De acordo Andrade (2005), a pesquisa realizada pela autora com ocupantes de trinta e dois edifícios de escritórios na cidade de São Paulo evidenciou que existe uma preocupação dos usuários quanto à qualidade do ar interno, mas que esta não está vinculada à presença de poluentes, e sim, ao fato de não existirem janelas operantes nos edifícios, fato que causaria insegurança (Andrade, 2005).

Todavia, com relação às condições externas de São Paulo, os resultados do diagnóstico climático realizado no item 1.1.2.1 apontam à necessidade do uso de sistemas de condicionamento de ar em edifícios na cidade por apenas 10% do ano, sendo recomendada a ventilação natural dos ambientes por até 46,3% do tempo, e por até 89,2% do ano se aliada a outras estratégias passivas, como o uso de materiais com inércia térmica expostos nos ambientes<sup>52</sup>.

A elaboração do projeto do envelope do edifício de escritórios com falta de critérios de desempenho térmico pode ser enfatizada como um fator de influência para ampla adoção do sistema de condicionamento de ar nos ambientes internos. Destacam-se os materiais empregados, com excesso de superfícies transparentes, e principalmente a falta de preocupação com a orientação das fachadas, frequentemente resultando num maior ganho de calor.

*Quanto às fachadas (dos edifícios de escritórios recentes brasileiros), (...) elas são na maior parte em vidro, independente da região onde o edifício esteja situado, ou seja, seguem o padrão de uma arquitetura globalizada importada, por estratégia de vendas ou para seguir uma tendência dos tempos atuais, sem a preocupação com as variáveis climáticas e os impactos no ambiente construído. (Andrade, 2005, p.8.7)*

### 1.3.2. Edifícios de escritórios brasileiros a partir de 2005

Os exemplos recentes de edifícios de escritórios no Brasil refletem a atual fase de crescimento econômico do país<sup>53</sup>, a qual motivou o aquecimento do setor de imóveis comerciais, especialmente em São Paulo e no Rio de Janeiro. Nessas cidades, verifica-se uma demanda crescente por escritórios de "alto padrão", como discursam os clientes e os agentes do mercado imobiliário local (construtores e incorporadores, entre outros).

Segundo critérios estabelecidos pelas consultorias imobiliárias, características necessárias para a classificação de um edifício em "alto padrão" (ou de classe "AAA", remetendo à classificação norte-americana) incluem: plantas livres com alta flexibilidade para determinação e alteração de layouts internos; elevado grau de automação e gerenciamento predial no edifício (incluindo cabeamento estruturado, acesso à internet, elevadores automatizados, sistemas de segurança patrimonial e incêndio, entre outros); sistemas construtivos de primeira linha (com pisos elevados, forros rebaixados e fachada com estrutura metálica e/ou com acabamento em vidro, entre outros); pé direito interno com mais de 2,5 metros de altura, para permitir a instalação de sistemas e tubulações; sistema de condicionamento de ar central; relação entre vaga de garagem e área útil, etc (Veronezzi, 2004 apud Andrade, 2005; Cassaro, Os espaços de escritórios disponíveis para locação e a construção de novos edifícios são

insuficientes para suprir a demanda existente. Especificamente para a cidade de São Paulo, a taxa de vacância atual para o seguimento de alto padrão é de 7%, a menor da década<sup>54</sup>. Como resultado, ocorreram altas nos preços do m<sup>2</sup> de escritórios, tanto para aluguéis quanto para compra de novos edifícios, chegando a uma elevação de 48% em São Paulo e até 70% no Rio de Janeiro no período de 2006 a 2008<sup>55</sup>.

Cabe ressaltar que os edifícios de alto padrão procurados não correspondem à realidade total do estoque de edifícios de escritórios brasileiros. A pesquisa desenvolvida por Andrade (2005) identificou que os edifícios com essas características correspondiam a menos de 25% do estoque real de edifícios em São Paulo, que era da ordem de 8,5 milhões de m<sup>2</sup>.

Dentre os argumentos verificados para essa demanda, além de empresas em expansão e novas companhias entrantes no país, destaca-se a busca por escritórios com mais qualidade por quem já está instalado – ou mais tecnologia. Verifica-se, nesse contexto, a existência de uma demanda por grandes áreas de escritórios, com casos de até 10.000 m<sup>2</sup>, para abrigar empresas de grande porte, tanto novas quanto em expansão. Tais empresas buscam instalações em longo prazo, e frequentemente desejam abrigar todos os funcionários em um único local, o que demandaria a existência de vários andares disponíveis no mesmo edifício, ou até uma edificação inteira<sup>56</sup>.

Nesse contexto economicamente positivo para o país, o mercado imobiliário altamente aquecido aparece vinculado à busca crescente pelos chamados “green buildings” ou “edifícios verdes” ou “edifícios sustentáveis”, todos enquadrados na classificação de alto padrão do mercado. Tal fato reflete a magnitude da discussão vigente em escala global, a qual começa a adquirir maior expressão no país na segunda metade da década de 2000.

### 1.3.2.1. A busca pelo “green building”

Uma nova geração de edifícios de escritórios recentemente projetados e/ou construídos no Brasil argumenta a preocupação com questões de impacto ambiental, eficiência energética e sustentabilidade em seus projetos. A maior quantidade desses exemplos se concentra em São Paulo, mas alguns edifícios são localizados, ou sua construção está prevista, em cidades como Rio de Janeiro, Goiânia e Curitiba.

Característica comum aos edifícios dessa geração, a busca pela certificação de edifícios ou certificação de “green building” teve início recentemente no Brasil e se proliferou, principalmente para a tipologia de escritórios.

Como ainda não existe um selo genuinamente brasileiro<sup>57</sup>, teve início, aqui, a adoção de um dos certificados internacionais, o LEED (mencionado no item 1.2), especialmente na categoria CS – *Core and Shell*, a qual compreende edifícios conformados por pavimentos tipo e *cores* de serviço centrais (USGBC, 2009). O processo aconteceu num espaço de tempo tão curto que o primeiro exemplo da tipologia de escritórios a pleitear a certificação LEED-CS no Brasil o fez com a obra do edifício já iniciada, tendo que incorporar modificações ao projeto inicial para adequá-lo ao maior número de exigências possível - e o mínimo necessário para atribuição do selo -, caso do Edifício Eldorado Business Tower em São Paulo<sup>58</sup>.

Diante do cenário local, observa-se a existência de um conflito no desenvolvimento da arquitetura dessa nova geração. Por um lado, ainda é frequente a reivindicação do “modelo internacional” de edifício de escritórios, referindo-se à tipologia de caixa envidraçada. Por outro lado, existe uma crescente solicitação por edifícios “sustentáveis” ou “green building” (Westphal, 2008). Nesses casos, verifica-se, de forma geral, uma falta de conhecimento técnico a respeito das questões abordadas e incertezas sobre o conceito da palavra “sustentabilidade”, fato já observado por Mulfarth (2003).

[56] Segundo Fabio Macieira, presidente da consultoria imobiliária Jones Lang La Salle, o estoque de escritórios de alto padrão existente em São Paulo e no Rio de Janeiro encontra-se espalhado, o que dificulta encontrar grandes áreas disponíveis num único local, como procuram tais empresas. O executivo acredita que essa situação não será revertida com a oferta comum de imóveis, mas sim com imóveis construídos para esse propósito, para grandes ocupantes. (Fonte: Bloomberg, 2008)

[57] Alguns passos foram dados na tentativa de adaptar uma certificação internacional ao nosso contexto, como o estabelecimento do Green Building Council Brasil (GBC) – Conselho Brasileiro de Prédios Verdes em janeiro de 2008. O GBC Brasil optou por disseminar no mercado o sistema de certificação LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) adaptado à realidade brasileira, e atualmente estuda propostas para tal. O processo encontra-se em andamento, e pretende-se estabelecer um modelo com critérios a serem seguidos no 2º semestre de 2009. Fonte: Página eletrônica do GBC Brasil. Disponível em: <<http://gbcbrasil.org.br/>>, acesso em agosto de 2008.

[58] Segundo a arquiteta Clarissa Correia da Gafisa, construtora responsável pela obra, existiram muitas dificuldades de alteração e adaptação de elementos e especificações no edifício, já que o processo aconteceu após a fase de projeto. A arquiteta afirmou que os próximos empreendimentos já serão pensados desde o início para pleitear o LEED, ressaltando a tendência pela certificação (Informação

verbal adquirida pela autora durante visita técnica à obra do edifício Eldorado Business Tower, em 20 de abril de 2007).

[59] Em 2008, mais de 50 empreendimentos estavam pleiteando o LEED no país, incluindo diferentes usos que vão desde hospitais e shopping centers até edifícios residenciais, como reflexo de uma demanda crescente pela certificação das edificações brasileiras. Com relação à tipologia de escritórios, vários edifícios estavam pleiteando o certificado na categoria Core & Shell na cidade de São Paulo, e dois no Rio de Janeiro. Destes, três edifícios paulistanos já obtiveram a pré-certificação e aguardavam a obtenção do selo final prevista para o final de 2008. (Fonte: informações disponíveis na página eletrônica do Green Building Council Brasil < <http://gbcbrasil.org.br> >, acesso em 03 jan 2008.

Conforme explica Silva (2003):

*(A expressão “Green Building” é) Frequentemente utilizada erroneamente em alternância com a expressão “Sustainable Building”. O termo “green” refere-se exclusivamente à dimensão ecológica (ou sustentabilidade ambiental) da “construção sustentável”, que é um conceito mais abrangente, que contempla ainda as dimensões social e econômica. (Silva, 2003, p.33)*

Ruy Rezende da RRA Arquitetura, autor do projeto do edifício Cidade Nova no Rio de Janeiro, acredita que a opção pelo “green building” (associando-o aos edifícios certificados) acontece porque traduz economia para o incorporador e para o usuário do edifício. Para o arquiteto, o custo inicial de um projeto que pretende adquirir um selo de “green building” é cerca de 10% superior em comparação ao custo de um projeto convencional, mas esse adicional se pagaria num período de 18 a 24 meses com redução de custos de condomínio e de operação do edifício. (Rezende, 2008).

Outro aspecto levantado para a demanda pela certificação dos edifícios de escritórios brasileiros<sup>59</sup> é o impacto que esta exerce no Índice de Sustentabilidade Empresarial (Westphal, 2008).

### 1.3.2.2. Características arquitetônicas. Modelo de edifício

Uma amostra de edifícios foi selecionada dentre os exemplos mais divulgados no cenário atual pleiteando a certificação de “green building”, e de cujos projetos foi possível obter a maior quantidade de informações técnicas. São eles:

- Eldorado Business Tower, inaugurado em 2007 em São Paulo (arquitetura: Aflalo e Gasperini);
- Edifício Nova Cidade, inaugurado em 2008 no Rio de Janeiro (arquitetura: RRA);
- Rochaverá Corporate Towers, construção da primeira fase inaugurada em 2008 em São Paulo (arquitetura: Aflalo e Gasperini);
- Ventura Corporate Towers, construção da primeira torre iniciada em 2008 no Rio de Janeiro (arquitetura: Kohn Pedersen Fox - KPF, adaptação local de Aflalo e Gasperini);
- E-Business, construção iniciada em 2008 em São Paulo (arquitetura: Aflalo e Gasperini);
- Prosperitas, construção iniciada em 2008 em São Paulo (arquitetura: Aflalo e Gasperini);
- Surubim, construção iniciada em 2008 em São Paulo (arquitetura: Aflalo e Gasperini).

Observa-se que, com exceção do Edifício Nova Cidade, todos os outros exemplos da amostra (Figura 97) tiveram o mesmo escritório de arquitetura responsável por seus projetos, ou participando destes<sup>60</sup>.

Quanto à arquitetura desses edifícios, identificam-se várias características presentes na geração anterior, sendo, ainda, baseados nos modelos selados operando com sistema de condicionamento de ar durante todo o período de ocupação.



Figura 97. Maquetes eletrônicas dos edifícios Rochaverá, Eldorado Business Tower, Prosperitas, E-Business, Ventura e Surubim (Fonte: Corbioli, 2007)

As plantas ainda tendem a formas retangulares ou quadradas, com layout livre e cores de serviço centrais. As áreas (de lajes) dos pavimentos tipo dos novos edifícios variam de 550m<sup>2</sup> a 2000m<sup>2</sup> aproximadamente, sendo a maior parte dos exemplos em torno de 1.000 - 1.500m<sup>2</sup> (Figuerola, 2007; Paiva, 2008; Visita Técnica, 2007; Moura, 2007). Apenas um exemplo apresenta lajes que ultrapassam 2.000 m<sup>2</sup>, caso do edifício Eldorado Business Tower, com pavimentos tipo entre 1.961m<sup>2</sup> e 2004m<sup>2</sup>. Esse edifício é o mais alto dos exemplos analisados, chegando a 141 metros de altura e apresentando 34 pavimentos tipo, (Figura 102).

Exceções a esse padrão acontecem em decorrência de especificidades da implantação dos edifícios (zoneamento, tamanho e forma do terreno, etc), como o caso do Cidade Nova no Rio de Janeiro, Figura 108. O programa do edifício Cidade Nova teve que ser adaptado a condicionantes urbanísticas e sociais. A forma e o volume do edifício foram definidos com base nos limites do terreno e em restrições de altura para a zona de implantação, além da proximidade ao Morro de São Carlos. Fugindo do padrão do modelo de edifício corporativo presente nos demais exemplos, em sua maioria paulistanos, o Cidade Nova possui nove andares com sete pavimentos tipo. Dois blocos retangulares, sendo um deles segmentado por um átrio central, compõem o pavimento tipo deste edifício, resultando numa grande laje de aproximadamente 4.000m<sup>2</sup>. Os serviços são concentrados em dois cores laterais, um em cada lado do átrio (Rezende, 2008).

Com relação à permanência do uso integral do sistema de condicionamento de ar, além das razões anteriormente apontadas, incluindo o rigor do clima na cidade do Rio de Janeiro (em oposição à condição climática em São Paulo), reforça-se o fato de que este é um requisito do mercado atual para que o edifício de escritórios seja classificado como “alto padrão”.

*O que se vê, mesmo nas melhores empresas para se trabalhar, são ambientes anacrônicos, quase alheios à nova ordem, não fosse pelo emprego de materiais e sistemas “globalizados”, típicos dos escritórios em qualquer lugar do mundo atual. (Andrade, 2005, p.10.1)*

Entretanto, cabe salientar a ocorrência de alguns avanços e benefícios na arquitetura dessa geração de edifícios de escritórios, comparativamente ao que vinha sendo feito no país, sob a ótica do conforto ambiental, do desempenho térmico e da eficiência energética. Certamente é necessário avaliar cada caso separadamente, pois os edifícios apresentam características diversas devido a especificidades de projeto e implantação, incluindo o clima externo. Contudo, alguns denominadores comuns são identificados em função dos requisitos pontuados pelas certificações, incluindo aspectos relacionados à infra-estrutura e a introdução de questões sociais e de transportes. Mencionam-se: o uso e o gerenciamento de água no edifício, com coleta de águas

[60] Diversos escritórios de arquitetura no mundo vem desenvolvendo projetos de edifícios altos com a introdução de conceitos de desempenho ambiental. Com uma produção significativa, escritórios como o americano Skidmore, Owning and Merrill e até o escritório brasileiro Afalo e Gasperini vem adquirindo papel de referência neste segmento no cenário internacional (Umakoshi, 2008).

[61] Menciona-se a lâmpada T5 de 28W, que apresenta nível de iluminação muito similar às antecessoras de 32W e 40W (Lamberts,

pluviais, tratamento e reutilização, além do uso de dispositivos economizadores como válvulas e torneiras; tratamento paisagístico com maior disponibilização de áreas permeáveis nos térreos ou coberturas; o gerenciamento dos resíduos, implantando coleta seletiva de lixo; a especificação mais cuidadosa de materiais, com maior emprego de reciclados e recicláveis, e com baixa emissão de COVs (compostos orgânicos voláteis), especialmente em referência à especificação de tintas e colas; uso de sistemas e componentes mais eficientes energeticamente, como sistema de condicionamento de ar, lâmpadas fluorescentes<sup>61</sup>, reatores e sensores de presença para acionamento dos sistemas; preocupação com a qualidade do ar interno, adotando edifícios não fumantes e sistemas de condicionamento ambiental com maior renovação do ar interno; provisão de bicicletários, entre outros (Moura, 2007; Corbioli, 2007; Visita Técnica 2007, 2008; RCRE, 2007; Umakoshi, 2008; Rezende, 2008; Westphal, 2008).

Mais especificamente em relação ao modelo de edifício e às estratégias de condicionamento ambiental, destacam-se aspectos referentes à configuração das fachadas, com redução de wwr e a especificação de vidros mais criteriosa, e à utilização de sistemas de condicionamento de ar mais eficientes. Essas características fazem um contraponto à geração anterior, a qual selou os edifícios em caixas de vidro e aplicou componentes e sistemas de forma arbitrária, com uso freqüente de vidros transparentes de alta refletividade externa e/ou vidros de cores escuras com elevada absorção à radiação solar, aliado ao uso abundante de persianas internas, entre outros aspectos, culminando com elevado consumo de energia.

Com relação à profundidade das plantas, observa-se que, apesar da existência de uma demanda por áreas maiores de escritórios, não houve um aumento significativo da distância máxima interna do *core* central até a fachada, mantendo-se o padrão existente. Os exemplos de edifícios analisados não apresentam áreas de trabalho com distâncias superiores a 14m, caso do Ventura Corporate Towers, em construção no Rio de Janeiro (Figuras 98 e 99) (Figuerola, 2007). Em se tratando dos projetos para São Paulo, verificam-se distâncias máximas em torno de 12m, como no Eldorado Business Tower (vide item 1.3.2.3). Percebe-se, no entanto, um aumento considerável da área dos *cores* centrais de serviços, ocupando até 30% da área dos pavimentos tipo e abrangendo até 18 elevadores, novamente o caso do edifício Eldorado (Westphal, 2008).

Outro item analisado, a altura de cada pavimento também não sofreu alterações significativas. Verificou-se, em geral, um pé direito de 3,80m de piso a piso nos escritórios, com cerca de 2,80m de vão livre interno, similarmente aos exemplos anteriores, os quais apresentam 2,70m de pé direito interno (Andrade, 2005). A diferença de aproximadamente 1m abriga laje, forro rebaixado e piso elevado, sendo os dois últimos elementos empregados para instalação e passagem de dutos e cabos, em decorrência da ampla utilização de sistemas.

Quanto ao desempenho térmico, um primeiro aspecto a ser levantado é a maior utilização de cores claras nas fachadas e na cobertura dos edifícios, contribuindo para aprimorar a reflexão da radiação solar incidente nesses elementos e reduzir parte da transmissão de calor através destes para o interior dos espaços de trabalho.

Especificamente com relação às fachadas, um avanço importante refere-se à redução do wwr de até 100% das caixas de vidro anteriores para cerca de 50% de áreas transparentes em relação às opacas nos novos edifícios, variando de 40% até 60%. Interessante notar que os projetos não chegam na etapa de consultoria para certificação com o valor de 40% de wwr como premissa inicial; a redução do wwr, quando acontece, vai sendo sugerida e argumentada pelos consultores ao longo do processo, e geralmente é necessária para aumentar a pontuação do edifício na obtenção do certificado (Westphal, 2008). Valores de 41%, 58% e 40% de wwr foram divulgados para os projetos dos edifícios Rochaverá, Ventura e Eldorado, pela equipe de arquitetura do escritório Aflalo & Gasperini (Corbioli, 2007; Paiva, 2008; Figuerola, 2007; Moura, 2007; Paiva & Silva, 2008).

As exigências das certificações contribuíram, também, para que os caixilhos empregados apresentem requisitos mínimos de qualidade quanto à infiltração, aspecto importante para a eficiência do sistema de condicionamento de ar. Este fato é especialmente relevante tendo em vista o *status* das normas brasileiras existentes para o desempenho de caixilhos: a NBR 10829:1989 e a NBR 10830:1989, as quais referem-se ao desempenho acústico, são antigas e estão desatualizadas; e as normas NBR 6485:2000, NBR 6486: 2000, NBR 6487: 2000, NBR 10820:1989, NBR 10821: 2000 e NBR 10831:1989, que abordam parâmetros de estanqueidade à água, infiltração de ar, resistência estrutural e estabilidade, estão desatualizadas e encontram-se em processo de revisão.

Outro item de destaque refere-se ao tipo de vidro utilizado nas fachadas dos escritórios. Nota-se que este aspecto já mudou bastante com relação à geração anterior, tanto na maneira de especificar, como na sofisticação do vidro que está sendo empregado. Observa-se que as especificações estão sendo feitas de forma mais criteriosa, não mais apenas em função da cor e espessura do vidro, mas sim em função da sua capacidade de seleção espectral. A composição mais detalhada do vidro abrange desde o processo de coloração e tratamento de cada camada para fins específicos, como maior resistência à poluição e absorção de partículas, e principalmente considerando os coeficientes os coeficientes fator solar (FS)<sup>62</sup> e coeficiente de sombreamento (CS)<sup>63</sup>, ligados ao espectro da radiação solar responsáveis pelo “calor”, e transmissão luminosa (TL), referindo-se à faixa de comprimento de onda da radiação visível.

Apesar da evolução da indústria de vidros nacional, algumas inovações tecnológicas ainda tem que ser importadas. Como exemplo, mencionam-se os vidros verdes laminados com *coating* de baixa emissividade (*low-e*) utilizados nos edifícios Eldorado e Cidade Nova, os quais apresentam diferentes propriedades entre si, e que foram produzidos na Holanda e na Alemanha, respectivamente (CBRE, 2007; Visita Técnica, 2007; Rezende, 2008) (vide item 1.3.2.3).

Nesse contexto, cabe enfatizar a necessidade de cuidadosa especificação e instalação desses novos materiais. Importar soluções sem o real conhecimento de sua aplicação pode acarretar num desempenho diverso ao desejado. Cita-se o caso da película *low-e*, amplamente empregada em edifícios europeus para evitar perda de calor interno por radiação nos períodos de frio rigoroso. Em edifícios brasileiros, o posicionamento dessa película com objetivo de reduzir ganhos de calor no ambiente por radiação, deve ser feito de forma oposta aos edifícios europeus<sup>64</sup>.

[62] A soma das parcelas de transmissão direta pelo vidro mais a parcela da energia absorvida e reirradiada para o interior é denominada “fator solar” (Fonte: Banco de Dados de vidros do Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP – LABAUT, disponível em <<http://www.usp.br/fau/pesquisa/laboratorios/labaut/conforto/index.html>>)

[63] Para viabilizar a comparação entre diferentes tipos de envidraçamento e sua combinação com diferentes tipos de proteção (brise externo, cortinas internas, etc) a ASHRAE (American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning) introduziu o conceito de coeficiente de sombreamento (CS). O CS é definido como a razão entre o fator solar (FS) e a mesma grandeza correspondente ao vidro padrão, definido como: vidro 3mm, incolor, não sombreado. (Fonte: Ibidem)

[64] As películas de *low-e* são um material ultra-fino e refletor de calor (infravermelho), feitas



Figura 98. Edifício Ventura: vista do interior de um pavimento de escritórios (Fonte: Figuerola, 2007)

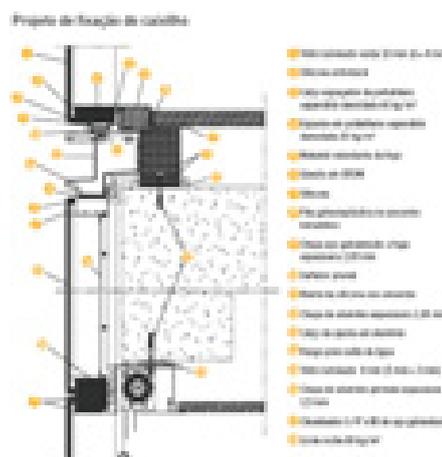


Figura 99. Edifício Ventura: detalhes de fixação do caixilho (Fonte: Figuerola, 2007)

O vidro também aparece compondo a parte opaca da fachada, cobrindo a estrutura interna do edifício (vigas, lajes e distância até o forro), como no caso do Eldorado, e com intenção de aplicação declarada para outros projetos em desenvolvimento. Contudo, a adoção de vidros opacos aparece como um aspecto polêmico. De acordo com normas dos bombeiros de proteção contra incêndio, a separação entre aberturas de pavimentos consecutivos nesses edifícios deve apresentar uma dimensão mínima

a base de metais e tornadas transparente. Desse modo, se aplicadas na face do vidro voltada para o ambiente interno, irão refletir o calor para dentro, evitando perdas para o exterior, caso dos edifícios europeus. No entanto, se as películas são aplicadas na face do vidro voltada ao exterior, essas irão refletir parte do calor incidente, reduzindo sua transmissão para o ambiente interno por condução – aplicação pretendida em edifícios brasileiros.

65 O corpo de bombeiros de São Paulo exige uma separação na fachada entre aberturas de pavimentos consecutivos, que podem se constituir de vigas e/ou parapeito ou prolongamento dos entrepisos, além do alinhamento da fachada. Para São Paulo, a Legislação Estadual estabelece que “quando a separação for provida por meio de vigas e/ou parapeitos, estes devem apresentar altura mínima de 1,2m separando aberturas de pavimentos consecutivos” (Decreto Estadual SP 46.076/04 e Instrução Técnica N° 09, 2004).

[66] Mesmo considerando uma baixa transmissão direta de radiação solar, devido às propriedades termo-físicas do material, o qual apresenta baixa resistência térmica (esta é função da espessura) e alta condutibilidade térmica, e ao fato de grande parte de sua área estar posicionada em frente a elementos estruturais do edifício como as vigas de borda e os extremos das lajes entre pavimentos, se não houver um isolamento adequado entre as partes ocorrerá um efeito de ponte térmica, sendo o calor absorvido pelo vidro transmitido à estrutura, ou aquecendo o ar do plenum conformado entre o forro e a laje, por condução e radiação, impactando na

de 1,20 metros<sup>65</sup> (Decreto Estadual e IT, 2009), o que corresponde a quase um terço da área de fachada de cada pavimento, sendo esse o elemento opaco coberto pelos vidros brancos. Considerando o wwr, ou seja, a proporção entre as superfícies transparentes e opacas, pela parte de fora do edifício, pode-se dizer que as fachadas desses edifícios são integralmente compostas por vidros<sup>66</sup>.

Tal situação certamente é mais agravante nos edifícios do tipo “cortina de vidro”, nos quais a totalidade da fachada é composta por vidros de maior transparência e maior transmissão solar<sup>67</sup>.

Quanto à questão energética, destaca-se o uso de sistemas mais eficientes nos edifícios nos edifícios analisados, independentemente da inexistência de uma legislação nacional que estipule parâmetros de desempenho energético para as edificações (ver item 1.3.3). Outro aspecto positivo é a realização de simulações computacionais anuais do edifício para previsão do desempenho desses sistemas, como parte dos requisitos para atribuição da certificação LEED.

Para o caso dos sistemas de condicionamento de ar, além da economia de energia, os sistemas são avaliados quanto à qualidade do ar interno, o que pode gerar condições aprimoradas para os novos escritórios, com relação aos anteriores.

Ainda com relação ao uso de sistemas de condicionamento de ar, verifica-se uma maior preocupação com o isolamento dos edifícios visando aprimorar o desempenho energético dos sistemas. O isolamento térmico dos escritórios com uso de materiais isolantes na fachada, seja na parte opaca ou com o uso de vidros duplos, deve ser atentamente analisado, para cada caso em particular. Novamente para esse aspecto é ressaltada a necessidade e a importância da avaliação de desempenho anual do edifício através de simulação computacional. Um conjunto de simulações computacionais realizadas para avaliação anual de edifícios de escritórios em São Paulo apontaram que, quando se tem muita área envidraçada, com wwr em torno de 60%, a utilização de vidro duplo na fachada acaba proporcionando desempenho inferior a um pano de vidro laminado, mesmo apresentando transmissão de radiação solar mais baixa que este, por que acaba armazenando calor no ambiente em algumas épocas do ano (Westphal, 2008). Tal fato acontece devido à condição climática específica da cidade de São Paulo, com a ocorrência de temperaturas do ar externo amenas por cerca de 70% do ano, em momentos em que os edifícios apresentam temperaturas internas mais elevadas e, portanto, podem perder calor pela envoltória (por condução). Com a presença de um maior isolamento na fachada transparente, essa perda de calor é impedida, aumentando o consumo energético do sistema de condicionamento de ar.

### 1.3.2.3. Exemplos em operação

Os avanços e tendências identificados na nova geração de edifícios de escritórios brasileiros em direção a uma arquitetura de menor impacto ambiental e desempenho energético aprimorado são apresentados em maior detalhe a seguir, com base nos dois exemplos de edifícios pioneiros dessa nova geração, já em funcionamento: Eldorado Business Tower, inaugurado em 2007 em São Paulo, e o Edifício Cidade Nova, inaugurado em 2008 no Rio de Janeiro. Ambos edifícios estão pleiteando a certificação LEED<sup>68</sup>.

O primeiro deles, Eldorado Business Tower, pode ser considerado representante do modelo típico de edifícios corporativos da nova geração em São Paulo. Tais exemplos apresentam caráter especulativo, sendo projetados para o mercado, geralmente com área disponível para locação por mais de uma empresa.

Com relação à arquitetura do edifício Eldorado, seu projeto sofreu modificações já com a obra iniciada, como comentado anteriormente, no intuito de obter a certificação LEED (o edifício foi o primeiro da tipologia de escritórios a pleitear a certificação no Brasil).

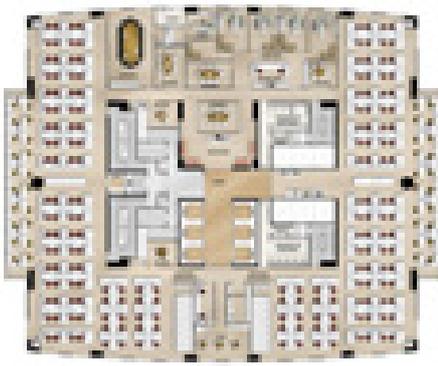


Figura 100. Edifício Eldorado Business Tower: planta do pavimento tipo para a zona média de escritórios, com sugestão de layout (Créditos: S. Fornazari)



Figura 101. Edifício Eldorado Business Tower: ilustração artística do core de serviços (Créditos: S. Fornazari)



Figura 102. Edifício Eldorado Business Tower: vista exterior da fachada NE, observando-se a estrutura sob o vidro verde.



Figura 103. Edifício Eldorado Business Tower: maquete eletrônica do edifício e seu entorno, nas diversas orientações (Créditos: S. Fornazari)



Figura 104. Edifício Eldorado Business Tower: interior de um escritório com o edifício em construção; radiação incidente na fachada NE às 11h (abril de 2007).



Figura 105. Edifício Eldorado Business Tower: aspecto rosado do vidro branco com a incidência de radiação solar, visto do interior do ambiente, antes do fechamento com drywall

temperatura do ar do ambiente interno.

[67] Nos edifícios existentes, o isolamento entre estrutura e fachada normalmente é feito com uma chapa metálica, como é possível observar na Figura 99. Atualmente novas soluções já são encontradas no mercado e estão sendo testadas em alguns dos novos edifícios. Cita-se um painel importado de lã de vidro com revestimento têxtil o qual é aplicado diretamente sobre as vigas de borda, com cores similares à do vidro, conferindo aspecto estético interessante e apresentando custo cinco vezes menor do que a solução em chapa metálica (Westphal, 2008).

[68] O levantamento de dados para este item do primeiro capítulo foi realizado até o final de 2008.

[69] Valores estimados com base nos desenhos do projeto fornecidos pelo escritório de arquitetura RRA para esta pesquisa

Apresentando 141 metros de altura e 115.000m<sup>2</sup> de área construída, o Eldorado possui 34 pavimentos tipo de escritórios, com planta praticamente quadrada, grande *core* central abrigando até 18 elevadores e distância máxima das áreas de trabalho até a fachada de aproximadamente 12 metros, (CBRE, 2007; Paiva & Silva, 2008) Figuras 100 a 105. O edifício é selado, ou seja, não existem janelas operantes para ventilação natural.

Três tipos de vidros foram escolhidos para as fachadas com a justificativa de aprimoramento do desempenho térmico, energético e luminoso, sendo dois verdes e um branco, fabricados por uma empresa holandesa (Visita Técnica, 2007; CBRE, 2007). O primeiro tipo de vidro verde, laminado pirolítico *low-e* 12mm, seria aplicado como janela, proporcionando contato com exterior. O segundo tipo foi colocado sobre as vigas, sendo escolhido um vidro mais comum e menos espesso: verde monolítico 8mm, serigrafado com tinta mais escura. Já o vidro branco, serigrafado temperado com 6mm e 8mm, opaco, foi adotado em frente a alvenaria e concreto (Moura, 2007; Paiva & Silva, 2008).

Observa-se que as fachadas são espelhadas duas a duas nas orientações NE/SO e SE/NO, como ilustra a Figura 103. Ainda com relação às fachadas, o *wwr* divulgado é de apenas 40% de superfícies transparentes e 60% de superfícies opacas, as últimas compostas pelos vidros brancos (Ibidem). Os caixilhos não abrem para ventilação natural e não são empregados elementos de proteção solar externos. Observa-se na Figura 104 a radiação solar incidindo diretamente no piso do primeiro andar de escritórios, e o contraste causado pela faixa mais iluminada próxima a fachada NE com relação ao interior do ambiente, às 11h da manhã de um dia de abril. Para os escritórios é apontada apenas a utilização de persianas internas, conforme desejo dos usuários. Acrescenta-se, ainda, a questão polêmica da utilização de vidros brancos como elementos da parte opaca da fachada, discutida anteriormente, e a utilização de vidros verdes sobre as vigas, como pode ser observado na Figura 102 e na Figura 105.

O sistema de condicionamento de ar utilizado no Eldorado é do tipo VRV com recuperador de calor na tomada de ar externo, apresentando menor consumo energético e custo operacional mais baixo em comparação aos sistemas tradicionais anteriormente empregados nos edifícios na cidade (Westphal, 2008). A água condensada nas serpentinas é encaminhada para um reservatório de águas de reuso, sendo posteriormente tratada e reaproveitada.

Ainda como parte das características de eficiência energética e inovação aclamadas, o edifício possui medidores individuais de consumo de água, energia e do sistema de condicionamento do ar; além de elevadores com frenagem regenerativa, sistema que reaproveita as sobras energéticas que ocorrem a cada parada da cabine, e antecipação de chamada (Ibidem).

Resultados das simulações computacionais do edifício realizadas para a certificação LEED indicaram 18% de economia no custo anual de operação do edifício em relação ao caso base de edifício simulado, o qual é usado como referência para comparação dos resultados de desempenho obtidos para o edifício em avaliação (Ibidem).

O Edifício Cidade Nova, por sua vez, se difere do grupo de edifícios de caráter especulativo em São Paulo em vários aspectos. Primeiramente pela localidade, é situado no Rio de Janeiro. Além disso, pela forma e volumetria diferenciada (Figuras 106 a 108). Em virtude de questões de implantação (mencionadas anteriormente), tal edifício não apresenta o pavimento tipo padrão com forma retangular ou quadrada, e sim um agrupamento de três partes retangulares, resultando em seis fachadas externas e altura total reduzida, com nove andares. O pé direito interno também é reduzido com relação aos demais exemplos, apresentando 2,55m de vão livre, mas ainda está presente o forro rebaixado e o piso elevado, em conformidade com os requisitos demandados para o edifício de alto padrão (Figura yy). Devido à grande

área de laje (de aproximadamente 4.000 m<sup>2</sup>), o edifício conta com um átrio interno com cobertura de vidro, o qual organiza a distribuição dos espaços e possibilita um maior acesso de iluminação natural. Ainda assim a planta chega a ser mais profunda em alguns pontos, com distâncias da fachada que variam de cerca de 12m, a 14,5m em sua maioria, até o máximo de 20m<sup>69</sup>, conforme observado na Figura y. Neste edifício, os serviços principais foram distribuídos em dois *cores* laterais, em lados opostos do átrio, com cinco elevadores cada, Figura 110 (Rezende, 2008).

70 O Cidade Nova foi originalmente concebido para abrigar a BR Distribuidora, mas hoje é ocupado pela Universidade Petrobrás e pelo setor de Recursos Humanos da empresa (Rezende, 2008).



Figura 106. Edifício Cidade Nova, no Rio de Janeiro: vista externa, fachada norte (Créditos: Celso Brando e Alex Ferro)



Figura 107. Edifício Cidade Nova: vista da fachada sudoeste (Créditos: Celso Brando e Alex Ferro)



Figura 108. Edifício Cidade Nova: vista externa da fachada nordeste (Créditos: Celso Brando e Alex Ferro)

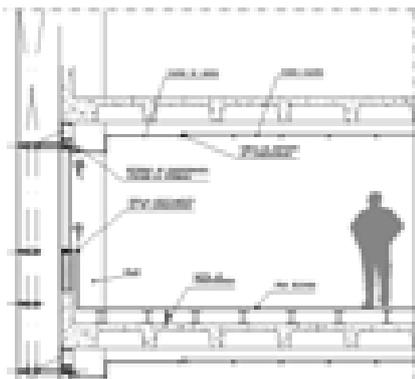


Figura 109. Edifício Cidade Nova: corte esquemático da fachada dos escritórios (Fonte: material fornecido pela RRA Arquitetura para esta pesquisa)

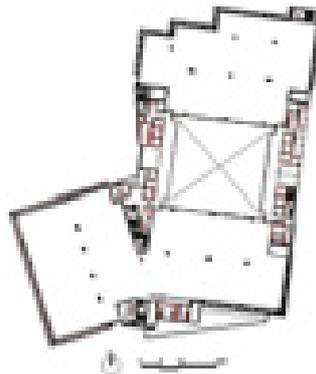
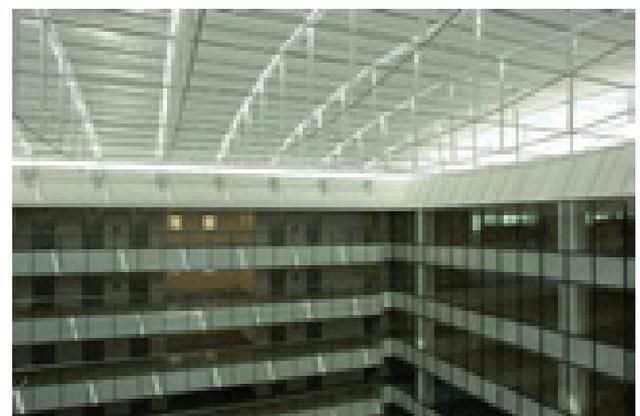


Figura 110. Edifício Cidade Nova: planta do pavimento tipo de escritórios (Fonte: material fornecido pela RRA Arquitetura para esta pesquisa)



Figura 111. Edifício Cidade Nova: vista da fachada dupla ventilada, com detalhe da abertura inferior para ventilação (Créditos: Celso Brando e Alex Ferro)



Figuras 112 e 113. Edifício Cidade Nova, no Rio de Janeiro: vista da cobertura do átrio, com e sem as persianas internas (Créditos: Celso Brando e Alex Ferro)

[71] A esse respeito, acredita-se que o potencial de ventilação natural deve ser avaliado e quantificado para cada edifício em específico através de avaliações de desempenho anual, com simulação computacional.

[72] Estudos realizados por pesquisadores da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, POLI-USP (Leite, 2003; Inatomi et al, 2007) discutem os potenciais benefícios dos sistemas de condicionamento com insuflamento de ar pelo piso para o conforto dos ocupantes e para o consumo de energia, comparativamente ao sistema tradicional com ar insuflado pelo forro.

Mas o principal aspecto que o difere dos demais é o caráter *self owner*, ou seja, o cliente que contratou o projeto de arquitetura será o usuário final do edifício<sup>70</sup>. Isto possibilita uma participação durante todas as etapas do projeto, inclusive da construção do edifício, e, principalmente, de sua operação. O que se nota, nesses casos, é a possibilidade de um maior investimento do cliente na fase inicial do projeto de arquitetura.

No caso do Cidade Nova, destaca-se a primeira fachada dupla ventilada adotada em edifícios brasileiros, sistema originado e comumente empregado em edifícios europeus, como verificado nos exemplos de edifícios internacionais anteriormente comentados (vide item 1.2). Aplicada em partes das seis fachadas externas com orientações distintas, aqui a fachada dupla ventilada foi pensada com o objetivo de permitir acesso a iluminação natural e ao mesmo tempo reduzir ganhos de radiação solar. Cobrindo os sete pavimentos tipo de escritórios, a segunda pele de vidro (laminado verde com 10mm de espessura e revestimento com película de baixa emissividade – *low e*) está afastada da fachada interna conformando uma cavidade de 60cm, aberta na base e no topo visando tirar partido do conceito de “efeito chaminé” para ventilação natural desse espaço. A cavidade da fachada dupla ventilada não apresenta nenhuma divisão interna, nem grelhas para manutenção (a qual será feita por rapel) (Rezende, 2008), Figura 111.

Conceitualmente, a camada de ar conformada pela cavidade de uma fachada dupla ventilada vai se aquecendo com a incidência de radiação solar através da segunda pele de vidro e, por diferença de pressão, tende a subir, conformando um fluxo de ar. Dependendo de cada contexto específico, tal fluxo pode reduzir a temperatura superficial da primeira pele, reduzindo, como consequência, a transferência de calor para o ambiente interno (Marcondes, 2004).

Apesar da sofisticação do sistema de fachada utilizado, no edifício Cidade Nova a fachada dupla ventilada não apresenta elementos de proteção solar incorporados na cavidade conformada pelas duas peles de vidro, característica típica dos exemplos europeus. Do mesmo modo que no edifício Eldorado Business Tower, o controle solar se dá pelos vidros especificados e uso de persianas internas.

Ainda a respeito do fechamento do edifício, a fachada voltada aos escritórios (ou seja, a primeira pele da fachada dupla ventilada) é do tipo “entre vãos” e com *wwr* visivelmente inferior a 50%, composta por alvenaria pintada de cor clara e superfícies envidraçadas de 1,60m de altura. O vidro empregado é laminado incolor de 8mm (vidro 4mm incolor reflexivo + pvb incolor 0,38 mm + vidro float 4 mm) (Rezende, 2008).

Seguindo o padrão dos edifícios dessa geração, as janelas do Edifício Nova Cidade não abrem para ventilação natural, nem no período noturno, e a possibilidade não chegou a ser considerada, no intuito de aprimorar a eficiência energética do sistema de condicionamento de ar (Rezende, 2008). De acordo com o diagnóstico climático realizado para o Rio de Janeiro (item 1.1.2.1 da tese), a estratégia da ventilação natural é recomendada por até 33% do ano para edifícios na cidade<sup>71</sup>.

Com relação aos sistemas empregados, o Nova Cidade possui tomada de ar externo para o sistema de condicionamento de ar, o qual conta com filtragem, desumidificação e barreira progressiva de resíduos. Esse sistema de condicionamento de ar é do tipo água gelada, gerada por múltiplos *chillers* a ar, com volume variável e reaproveitamento da água da condensação. Um diferencial do sistema em questão é o insuflamento pelo piso<sup>72</sup>, visando atender até 1,80m, faixa de altura onde estariam os usuários, com retorno através de frestas nas luminárias. De acordo com Rezende (2008), um menor volume de ar precisa ser condicionado no ambiente, contribuindo para um menor consumo de energia, estimado para ser cerca de 25% menor do que o processo de insuflamento convencional, pelo forro (vide detalhe na Figura 109). Os escritórios contam ainda com uma saída ar especial para resfriar a área próxima ao vidro interno, para a qual estão previstos sensores de controle no sistema de condicionamento de ar.

O *set point* de operação previsto para o sistema é de 21°C ±1°C (Ibidem).

Ainda com relação às tecnologias inovadoras dos sistemas, sensores de nível luminoso estão presentes na clarabóia de vidro laminado verde de 12mm de espessura. A proteção solar da clarabóia de 900m<sup>2</sup> é feita por meio de persianas internas automatizadas, cujo acionamento foi previsto para acontecer conforme as informações dos sensores (Figuras 112 e 113). O mesmo tipo de sensor também foi previsto no projeto de arquitetura para acionamento das persianas internas dos espaços de trabalho, todavia, não sendo incorporado ao edifício construído. (Ibidem).

Com relação ao desempenho do edifício, estimou-se, com relação aos edifícios convencionais: economia de quase 50% da energia consumida pelo sistema de condicionamento ambiental com a inclusão da segunda pele de vidro na fachada, economia que prevê um *payback* de quatro anos para a fachada dupla; redução de 30% no consumo energia total do edifício; redução de 75% dos resíduos gerados pela obra; economia de, 30-50% no consumo de água; redução de 40% nos custos de condomínio e de manutenção. (Ibidem).

Assim como para o Edifício Eldorado, a idéia de pleitear uma certificação de green building para o Nova Cidade aconteceu posteriormente ao início da construção do edifício, e partiu de uma proposição do próprio arquiteto para o cliente, no intuito de destacar as qualidades ambientais do projeto (Ibidem).

### 1.3.3. Iniciativa rumo a uma legislação energética para os edifícios brasileiros

Diante do contexto do projeto e da construção dos edifícios de escritórios comentados neste capítulo, uma iniciativa efetiva do governo brasileiro aconteceu com a criação da *Regulamentação para Etiquetagem Voluntária de Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos*, em 2006 (MME, 2006)<sup>73</sup>. A criação desta Regulamentação é fruto de um processo que teve início em 2001, como explica Lamberts et al. (2007):

*A primeira iniciativa efetiva no âmbito de legislações instituídas para promover a eficiência energética no país surgiu como consequência da crise de energia de 2001, quando foi sancionada a Lei No 10.295, de 17 de outubro de 2001, que “dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia” (BRASIL, 2001a). O artigo 4º desta lei afirma que “o Poder Executivo desenvolverá mecanismos que promovam a eficiência energética nas edificações construídas no País”. Dois meses depois a regulamentação foi publicada sob forma do Decreto 4.059 de 19 de dezembro de 2001, indicando, no artigo 1o, que “os níveis máximos de consumo de energia, ou mínimos de eficiência energética, (...), bem como as edificações construídas, serão estabelecidos com base em indicadores técnicos e regulamentação específica (...)” (Brasil, 2001b). No decreto, fica instituído o Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética - CGIEE, composto por representantes do Ministério de Minas e Energia; Ministério da Ciência e Tecnologia; Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, além de representantes da Agência Nacional de Energia Elétrica; Agência Nacional do Petróleo, e um representante de universidade brasileira e um cidadão brasileiro, ambos especialistas em matéria de energia. No âmbito desse decreto, cria-se o Grupo Técnico para Eficientização de Energia nas Edificações no País (GT-MME) (Lamberts et al, 2007, p.1022)*

Em 2009, a Regulamentação para Etiquetagem foi publicada sob o título de *Regulamento Técnico da Qualidade (RTQ) do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Público* (MME, 2009). O RTQ vigora em caráter voluntário, mas está previsto para vigorar em caráter obrigatório para os edifícios comerciais no país em um período de até cinco anos após sua promulgação.

O RTQ apresenta os requisitos técnicos necessários para a classificação do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos com área total útil

[73] Regulamentação elaborada pelo Laboratório de Eficiência Energética em Edificações, Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina através do convênio ECV 007/2004 firmado com a Eletrobrás no âmbito do programa Procel EDIFICA. As discussões envolvidas no processo foram conduzidas na Secretaria Técnica e submetidas ao GT Edificações do MME que após aprovação enviou para o Comitê Gestor de Índices e Níveis de Eficiência Energética – CGIEE (Decreto nº 4.059 de 19 de dezembro de 2001) (Fonte: MME 2006)

mínima de 500m<sup>2</sup> ou com tensão de abastecimento superior ou igual a 2,3kV, incluindo edifícios condicionados, parcialmente condicionados e naturalmente ventilados, visando a etiquetagem voluntária, com foco na eficiência energética (MME, 2006). Este regulamento baseia-se em três requisitos principais: eficiência e potência instalada do sistema de iluminação, eficiência do sistema de condicionamento do ar e o desempenho térmico da envoltória do edifício.

Aparentemente ainda não muito comentada no setor da construção civil e no mercado imobiliário local, espera-se que a implementação do RTQ em caráter obrigatório, o que está previsto para 2012, promova mudanças efetivas no cenário nacional da produção de edifícios de escritórios, tanto com relação ao aprimoramento do projeto arquitetônico e do modelo de edifício, ao abordar o desempenho térmico da envoltória; impulsionando a produção de equipamentos mais eficientes pela indústria nacional, ao estabelecer critérios de desempenho e consumo máximos; quanto promovendo uma educação dos usuários para que eles ocupem e operem os edifícios de modo mais consciente e eficiente.

Nesse sentido, destacam-se alguns aspectos apresentados pelo RTQ:

*Cabe salientar que nenhuma regulamentação por si garante um edifício de qualidade. Maiores níveis de eficiência podem ser alcançados através de estratégias de projeto e por iniciativas e cooperação dos diversos atores ligados à construção dos edifícios (arquitetos, engenheiros civis, eletricitistas, mecânicos e empreendedores). Igualmente, tão importantes e freqüentemente esquecidos, os usuários têm participação decisiva no uso de edifícios eficientes através dos seus hábitos, que podem reduzir de forma significativa o consumo de energia, aumentando assim a eficiência das edificações e reduzindo desperdícios. Todos os envolvidos na concepção e utilização dos edifícios e seus sistemas podem contribuir para criar e manter edificações energeticamente eficientes.*

*(...) O regulamento deve ser considerado como um desafio para procurar e efetivamente alcançar níveis mais elevados de eficiência energética nas edificações. A obtenção de uma etiqueta de eficiência não é definitiva e pode ser continuamente melhorada com inovações tecnológicas ao longo dos anos, criando um hábito do aprimoramento constante em eficiência energética, da concepção ao uso do edifício.*

*(...) Finalmente, para atingir e manter níveis mais elevados de eficiência é muito importante a participação dos usuários. Um edifício eficiente com usuários ineficientes pode tornar-se um edifício ineficiente. Da mesma forma, edifícios ineficientes, podem aumentar de forma considerável a sua eficiência se houver um empenho dos seus usuários nesse sentido. (MME, 2009, p.7-8)*

O RTQ é apresentado em maior detalhe no item 2.2.1 do capítulo 2.

Por fim, espera-se que essa iniciativa se desenvolva rumo ao estabelecimento de um código energético Brasileiro, como existente em diversos países como a Inglaterra e a Alemanha.

## 1.4. Considerações Finais

Abordando a temática do conforto ambiental, da eficiência energética e da sustentabilidade na arquitetura dos edifícios de escritórios, é imperativo analisar cada exemplo em seu contexto específico, considerando as diferenças urbanísticas, econômicas, sociais e, principalmente, das condicionantes climáticas. Merecem destaque, também: as exigências e expectativas dos usuários e clientes com relação

às condições ambientais internas e sua conscientização sobre as questões de impacto ambiental e energético; a existência (ou não) de normas e regulamentações específicas; o papel do poder público; a disponibilidade de recursos e a produção da indústria de materiais e componentes da construção, entre outros. Ressalta-se a existência de grandes diferenças nos aspectos mencionados para os cenários avaliados neste trabalho: o contexto brasileiro e o internacional.

Foram apresentados dezesseis edifícios de escritórios principais localizados em diferentes cidades do mundo, aclamados como ícones da sustentabilidade para seus contextos; catorze internacionais e dois Com base na análise da arquitetura desses exemplos, verificou-se que, na totalidade dos casos, as soluções de projeto e as estratégias empregadas para o aprimoramento do desempenho ambiental e energético dos edifícios remetem à fachada como elemento fundamental para a eficiência do conjunto (confirmando-se a tendência apontada por Arons & Glicksman, 2000, e Buchanan, 2003, na introdução deste capítulo). Nesse sentido, a fachada é, também, o elemento de maior destaque no discurso de divulgação desses edifícios ou “marketing ambiental” realizado perante o mercado internacional.

Nota-se nas soluções de fachadas empregadas a especificação mais detalhada dos materiais que as compõe, principalmente dos vidros. A especificação é feita com relação tanto às características de transmissão luminosa, no intuito de maximização, quanto às características de trocas térmicas entre o ambiente interno e o exterior, visando reduzir ganhos de calor no edifício e/ou diminuir as perdas de carga térmica, dependendo das condições climáticas específicas. Desse modo, o projeto das fachadas indica uma preocupação em aprimorar o acesso de luz natural e o desempenho térmico dos escritórios.

As inovações referentes às fachadas dos edifícios aparecem também no aspecto de composição, com a proposição de diferentes tipologias, inclusive apresentando diferentes tipos de fachadas duplas ventiladas, fato recorrente nos edifícios internacionais e presente em um edifício brasileiro.

Menciona-se a presença de elementos de proteção solar externos e/ou entre panos de vidro nas fachadas em onze dos exemplos comentados, todos do contexto internacional, a dizer: New York Times Building, em Nova York; os quatro alemães, os quatro na cidade de Londres, e os dois australianos. Os dispositivos de proteção solar são elementos importantes para o controle dos ganhos de calor e da incidência da luz natural nos edifícios, ao passo que reduzem parte da incidência direta de radiação solar no ambiente interno. Seu posicionamento entre panos de vidro, ou ainda, na parte externa das fachadas, contribui para aumentar sua eficiência quanto à redução dos ganhos de carga térmica nos ambientes em comparação ao uso de elementos internos - caso das cortinas ou persianas tradicionalmente empregadas nos edifícios brasileiros.

Com relação à ventilação natural dos edifícios, mesmo antes de considerar as especificidades do projeto arquitetônico, a possibilidade de inclusão dessa estratégia vai depender de dois fatores principais: que as condições do clima externo estejam favoráveis (isto é, que apresentem condições adequadas de temperatura do ar e umidade do ar<sup>74</sup>) e da expectativa e aceitação dos usuários com relação às condições ambientais internas.

A ventilação natural dos ambientes exige uma maior tolerância dos usuários às variações nas condições do ambiente, tendo em vista que essas tendem a acompanhar a flutuação das condições climáticas externas. Adicionalmente, é necessária a aceitação limites mais abrangentes de temperatura e umidade do ar, para prolongar o período de ventilação natural dos edifícios e viabilizar a incorporação dessa estratégia.

Por outro lado, ainda considerando-se a variabilidade nas condições ambientais

[74] Aqui discorre-se apenas sobre a possibilidade de inclusão da estratégia, desconsiderando-se questões de poluição do ar e ruído. Para a eficiência da estratégia de ventilação natural contribuem, adicionalmente, as condições de direção e intensidade do vento externo.

externas e internas dos escritórios, quanto mais flexível e adaptável for o edifício, maior a possibilidade de se utilizar a ventilação natural para o condicionamento ambiental dos ambientes.

Nesse sentido, dentre os 16 edifícios apresentados, os doze exemplos que argumentaram incorporar a ventilação natural mencionavam a utilização de estratégias de condicionamento ambiental em modo-misto. Entretanto, verificou-se que em quatro desses edifícios as situações proporcionadas não correspondem ao conceito de modo-misto, o qual pressupõe a ocorrência de períodos com condicionamento natural do ambiente interno (CIBSE AM13, 2000) (vide Introdução deste capítulo): no edifício Hearst, em Nova York, a atribuição do termo “modo-misto” estava vinculada à utilização de ar externo pelo sistema de climatização, o qual se acredita ser um sistema de *free-cooling*; já nos edifícios Leadenhall 122, Bishopsgate e Heron Tower, todos na cidade de Londres, o termo em questão faz referência à ventilação natural das fachadas duplas, sendo utilizados sistemas ativos para o condicionamento ambiental dos ambientes durante todo o período de ocupação.

Desse modo, o termo “modo-misto” pode ser considerado um dos símbolos do apelo ambiental inerente à arquitetura da geração de edifícios de escritórios da primeira década dos anos 2000. Ou seja, o argumento da inclusão da ventilação natural no edifício (e/ou da conseqüente redução do uso de sistemas prediais para o condicionamento ambiental) é almejado pelos profissionais envolvidos no projeto, construção e “comercialização” dos edifícios de escritórios dessa geração.

Com base na análise do clima das cidades de implantação dos edifícios elencados, pode-se dizer que existe um potencial para o condicionamento natural das edificações (visando a obtenção de condições adequadas de conforto térmico), por meio da aplicação da ventilação natural aliada a estratégias passivas, por até 32% do período de ocupação no ano no Rio de Janeiro; por cerca de 70% nas cidades alemãs Frankfurt Am Main, Berlin e Bonn, em Nova York, Londres e Tokyo; por até 89,2% em São Paulo, por mais de 90% do ano nas cidades australianas de Sydney e Melbourne.

No entanto, apenas oito dos dezesseis edifícios elencados incorporam a ventilação natural em seu interior: os quatro edifícios situados nas cidades alemãs Commerzbank em Frankfurt Am Main, Debis e GSW em Berlin, e Deutsch Post Office Tower em Bonn; o St. Marys Axe (Swiss Ree) em Londres; o Aurora Place e o CH2 nas cidades australianas Sydney e Melbourne, respectivamente; e o Shiodome Tower em Tokyo.

A análise dos exemplos de edifícios identificados com ventilação natural, todos operantes no cenário internacional, evidenciou claramente a presença de projetos arquitetônicos diferenciados em relação à tipologia de edifício comercial internacional (a qual é marcada por plantas profundas com *core* de serviços centralizado; fachadas do tipo cortina-de-vidro; ausência de caixilhos operantes; ausência de elementos de proteção solar externos; ampla utilização de sistemas para condicionamento ambiental; pisos elevados e forros rebaixados para abrigar cabos e sistemas, compostos por materiais isolantes térmicos; entre outros), na forma, e primordialmente no modelo de edifício. Em alguns casos

Destacam-se os aspectos:

- Quanto às plantas

As plantas dos pavimentos tipo são menos profundas, principalmente nos edifícios alemães, nos quais apresenta layout celular. Um aspecto positivo da divisão em salas é a possibilidade do controle individualizado da operação das janelas para ventilação natural e, conseqüentemente, das condições ambientais internas, sem interferir nas condições das outras salas (e independentemente do voto dos outros usuários);

Alguns casos apresentam pé direito interno livre mais generoso, com 2,9 m no edifício Debis, em Berlin, e variável até 3,35 m no edifício australiano CH2;

#### ■ Quanto às fachadas

As fachadas são mais elaboradas, incluindo: a especificação dos componentes opacos e transparentes, em diversas camadas; a presença de dispositivos adicionais tanto para proteção e controle solar quanto para aprimoramento das condições aerodinâmicas (evitar fortes pressões na fachada; proteção contra rajadas de vento e/ou direcionamento do vento incidente no ambiente interno); o dimensionamento e posicionamento das aberturas.

Enfatiza-se a inexistência de uma tipologia única de fachada adequada à ventilação natural. Cada edifício utiliza uma solução diferente, projetada em função dos requisitos funcionais e climáticos específicos. Com frequência, nota-se a diferenciação de fachadas no edifício, em função de diferentes orientações ou requisitos de uso e ocupação.

As fachadas com maiores superfícies envidraçadas estão presentes nos edifícios das cidades alemãs e na cidade de Londres, cujas análises climáticas apontaram uma baixa disponibilidade de luz natural. No entanto, em todos esses edifícios as fachadas transparentes possuem elementos de proteção solar móveis, localizados entre as duas peles das fachadas duplas ventiladas, ou na forma de venezianas embutidas nos vidros duplos das janelas, como empregado no edifício Commerzbank (em ambas as salas voltadas para o átrio e para o exterior), e na fachada leste do edifício GSW.

Exceção ao conjunto, o edifício japonês Shiodome não traz elementos de proteção solar às superfícies envidraçadas de suas fachadas, entretanto, apresenta wwr reduzido, com a presença de material cerâmico revestindo o componente opaco da fachada.

Dentre os elementos empregados para proteção e/ou controle solar, cabe ressaltar as propostas apresentadas pelo edifício CH2, com brises móveis de madeira acionados por sensores que rastreiam a posição do sol, as chapas metálicas perfuradas e o uso de varandas com vegetação, e os brises móveis coloridos das fachadas duplas do GSW, os quais proporcionam um inusitado efeito plástico.

#### ■ Quanto às estratégias empregadas e modos de operação do edifício

Observou-se a presença de um maior número de estratégias, tanto passivas, quanto estratégias ativas de menor consumo energético em comparação a sistemas de condicionamento de ar tradicionais. Seu emprego evidenciou uma maior criatividade e experimentação de diferentes combinações.

Dentre as estratégias ativas alternativas, mencionam-se os tetos e as vigas frias, os quais possuem canos em seu interior por onde pode passar água gelada, e desse modo, esses dispositivos tiram partido do processo de troca térmica por radiação para condicionar o ambiente. Alternativamente, podem ser usados para aquecimento.

Com relação às estratégias passivas, destaca-se a ampla adoção de materiais com inércia térmica expostos nos ambientes, seja nos forros ou por meio da exposição das lajes de concreto, inclusive dos tetos e vigas frias quando a circulação de água nesses dispositivos não é acionada. O uso de massa térmica é frequentemente aliado à estratégia de ventilação noturna. Desse modo, tira-se partido da capacidade de armazenar calor desses materiais durante o período de ocupação dos escritórios, no qual é gerada a maior quantidade de carga térmica interna, beneficiando-se da ventilação noturna para resfriar essas superfícies e dissipar o calor acumulado no ambiente.

[75] Dados de 2010 indicam que após a crise econômica mundial ocorrida entre 2008 e 2009, o mercado imobiliário brasileiro referente aos edifícios de escritórios encontra-se novamente aquecido, apresentando demandas para as cidades de São e do Rio de Janeiro que ultrapassam aquelas verificadas no item 1.3.2 deste capítulo, baseadas em dados obtidos até 2007. Um dos principais motivos para essa demanda seria a definição da cidade do rio de Janeiro para sediar a Copa do Mundo em 2014 e os Jogos Olímpicos em 2016, fatos que colocaram o país em evidência no contexto internacional.

O edifício tende a ser mais flexível quanto maior a quantidade de elementos e estratégias disponíveis. Desse modo, sua adaptabilidade às variações nas condições de uso do ambiente e às condições climáticas externas pode ser potencializada, contribuindo para a eficiência da estratégia de condicionamento ambiental em modo-misto. Este aspecto adquire maior relevância em localidades com extremos de rigor climático, nas quais demandas opostas de aquecimento e resfriamento dos edifícios acontecem ao longo do ano (caso das cidades de Nova York e Tokyo).

#### ■ Quanto à configuração do edifício

Notou-se a tendência de segmentação dos edifícios, verticalmente, com o agrupamento de pavimentos em vilas. A segmentação vertical do edifício com ventilação natural objetiva auxiliar na previsão e no dimensionamento dos complexos efeitos aerodinâmicos, contribuindo para um controle mais eficiente da ventilação durante a operação do edifício. Auxiliam nesse processo alguns elementos como átrios, skycourts ou skygardens, os quais aparecem em cinco dos edifícios destacados (com exceção do GSW, do Aurora Place e do CH2). Outras funções inerentes ao emprego dos átrios, skycourts ou skygardens são permitir um maior acesso da iluminação natural no interior dos escritórios e conformar áreas de convívio, lazer e conexão visual com o exterior.

#### ■ Quanto ao modo de ventilação natural

A ventilação natural nos edifícios elencados acontece de três modos diferentes: (a) via abertura de janelas diretamente ao exterior, caso de parte dos ambientes dos edifícios Commerzbank, Debis GSW e Aurora Place; (b) por meio de abertura de janelas para a cavidade de fachadas duplas ventiladas e/ou para átrios, skycourts ou skygardens, os quais, por sua vez, possuem aberturas diretas para o exterior, caso dos demais escritórios dos edifícios acima mencionados e do edifício Deutsch Post; e (c) de modo indireto, sendo transportada ao interior da edificação por dutos e outros dispositivos, como nos edifícios St. Marys Axe (Swiss Ree), CH2 e Shiodome.

#### ■ Quanto ao processo de projeto

Todos os edifícios destacados incluíram a realização de avaliações de desempenho ambiental anual das soluções desde fases iniciais de projeto, com a utilização de ferramentas avançadas de simulação computacional, incluindo simulações de termodinâmica e de dinâmica de fluidos.

Vale ressaltar a importância do projeto arquitetônico e da adequada operação do edifício pelos usuários para o desempenho final da edificação com ventilação natural. Menciona-se o caso do Commerzbank, cujos dados do edifício em funcionamento indicaram que o condicionamento ambiental dos escritórios é realizado com ventilação natural por até 80% do ano, superando as previsões iniciais de projeto, e ultrapassando o potencial de incorporação dessa estratégia estimado apenas com base no clima da cidade de Frankfurt.

Abordando o contexto brasileiro, pode-se dizer que a nova geração de edifícios de escritórios que argumenta uma maior preocupação com aspectos de desempenho ambiental, energético, e de sustentabilidade em sua arquitetura tem início em 2007, com a inauguração do edifício Eldorado Business Tower, em São Paulo.

Os exemplos dessa geração de edifícios aparecem concentrados nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro. Esses são incluídos na classificação de “alto padrão” imposta pelo mercado imobiliário, e representam uma minoria perante o estoque de edifícios existentes no país.

No entanto, a quantidade de edifícios nacionais com esse caráter tende a aumentar, por três motivos principais. Em primeiro lugar, pela alta demanda por edifícios de

escritórios de alto padrão constatada no mercado imobiliário brasileiro<sup>75</sup>. Em segundo lugar, pela visibilidade crescente do tema da sustentabilidade e da eficiência energética de edifícios no contexto nacional - inclusive para se adequar às demandas do mercado internacional. E em terceiro lugar, pela veiculação do *Regulamento Técnico da Qualidade (RTQ) do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Público* em caráter obrigatório no país em meados de 2012.

Verificou-se que os edifícios dessa geração ainda mantêm características dos modelos das gerações anteriores, baseados no modelo de arquitetura comercial internacional, e principalmente influenciados por padrões norte-americanos, mencionando-se:

- Características formais: formas retangulares ou quadradas;
- Configuração interna: planta com layout livre e *cores* de serviços centrais;
- Estratégia de condicionamento ambiental: uso de sistema de condicionamento de ar por todo o período ocupado;
- Conexão com exterior: fachadas “seladas”, inexistência de caixilhos operantes e ausência de elementos de proteção solar externos

Um aspecto novo e representativo dessa geração de edifícios de escritórios é a busca pela certificação americana LEED, a qual se tornou uma tendência forte e crescente para edifícios brasileiros com diversas tipologias em diversos setores.

O tema da “importação” de certificações para edifícios brasileiros vem sendo investigado e debatido por profissionais e pesquisadores locais (Silva, 2003; Vosgueritchian, 2006; Hernandez, 2007)<sup>76</sup>. Estes atentam para possíveis divergências que podem ocorrer no processo de atribuição de certificações internacionais aos edifícios brasileiros, perante os objetivos originais pretendidos por essas certificações, as quais deveriam atuar como ferramentas de avaliação do processo de construção e do desempenho dos edifícios inseridos no mesmo contexto onde foram originadas.

Nesse sentido, ainda que existam algumas questões ambientais com efeitos globais, como aquecimento global, dano à camada de ozônio, esgotamento de florestas, etc, a aplicação de certificações internacionais sem a devida adequação de critérios e ponderações ao contexto local (econômico, urbanístico, ambiental, social, climático<sup>77</sup>, às práticas de construção e disponibilidade de materiais locais, às regulamentações e normas técnicas, entre outros), fatalmente trará baixa eficiência em alguma etapa do processo, não refletindo as prioridades e interesses nacionais (Silva, 2007<sup>78</sup>; Hernandez, 2007).

No caso de São Paulo, por exemplo, verifica-se a provisão de bicicletários nos projetos de todos os edifícios que pleitearam ou pleiteiam a certificação LEED, seguindo um dos requisitos para obter pontuação. De acordo com a versão de 2009 do *LEED for Core & Shell Development Rating System* (USGBC, 2009), documento que traz a estrutura de critérios de avaliação para a tipologia de edifícios considerada neste trabalho, a provisão de espaços para estacionamento de bicicletas para 3% dos ocupantes juntamente a vestiários para 0,5% dos ocupantes efetivos, medida de relativa simplicidade de implantação, garante a atribuição de 2 *pontos* no processo (critério 4.2 : “Sítios Sustentáveis”; Transporte Alternativo). Comparativamente, o dimensionamento de uma estratégia para ventilação natural no edifício (item identificado como a principal estratégia para obtenção de conforto ambiental em edifícios na cidade, sendo recomendada isoladamente por cerca de 46,4% do ano, e aliada a estratégias passivas, até 89,2% do ano) e comprovação de sua eficácia, confere apenas 1 *ponto*. Do mesmo modo, o atendimento aos requisitos de conforto térmico conforme a norma americana ASHRAE Standard 55-2004 (critério 7: “Qualidade Ambiental Interna”; Conforto Térmico - Projeto) também representa apenas 1 *ponto* na certificação

[76] Com base na prática de aplicação do BREEAM e do LEED a edifícios fora de seus países de origem, Silva (2003) afirma que “a dificuldade de adequação aos locais de avaliação ia além da retirada ou adição de aspectos a avaliar, e que os resultados das adaptações revelavam-se, na verdade, como novos sistemas, muito diferentes dos métodos originais” (Silva, 2003, p.192).

[77] Ainda que seja utilizada nas simulações computacionais uma base de dados climáticos do local a ser avaliado, a ponderação e pontuação dos critérios avaliados pelo LEED foram estabelecidas com base nas condições climáticas norte-americanas, onde é verificada a ocorrência de invernos rigorosos (o que explicaria o ato de selar os edifícios para evitar perda de calor interno nos períodos frios), diferentemente das condições da cidade de São Paulo, por exemplo.

[78] Informação verbal fornecida por Silva em palestra proferida no Ciclo de Debates em Construção Civil Sustentável, da Secretaria Estadual do Meio Ambiente - SEMA, em São Paulo, em outubro de 2007.

[79] A esse respeito, a ASHRAE divulgou uma nova certificação direcionada para os profissionais que executam simulações computacionais: "Building Energy Modelling Professional". Esta certificação objetiva garantir qualidade no processo, e auxiliar engenheiros e arquitetos na elaboração de projetos eficientes. O 1º exame está previsto para acontecer no início de 2010 em Orlando, Flórida, USA. (Fonte: divulgação ASHRAE, disponível em <www.ashrae.org/BEMP> Acesso em: outubro de 2009)

[80] No levantamento realizado para esta pesquisa, constatou-se que profissionais envolvidos no projeto e na construção dos edifícios nacionais que contém esse elemento não sabem se o vidro foi posicionado com o coating de baixa emissividade voltado para o ambiente interno ou para o exterior. Ressalta-se que, caso ocorra um posicionamento oposto ao intencionado em projeto, o desempenho do componente pode ser comprometido.

[81] Chicanas são dispositivos que podem ser acoplados às fachadas com a função de atenuar o ruído externo quando o ar entra no edifício. Esses dispositivos são internamente revestidos por materiais absorvedores acústicos, e sua utilização aparece aliada a caixilhos fixos, como por exemplo, a colocação de chicanas com ventoinhas nos peitoris das janelas (Kiss, 1999).

(USGBC, 2009).

Entretanto, apesar da ressalva a respeito da aplicação de uma certificação internacional, é possível dizer a nova geração de edifícios de escritórios brasileiros apresenta alguns aspectos positivos fruto dos requisitos para pontuação no LEED, representando um avanço em relação aos edifícios da geração anterior, ainda que seja o mínimo necessário para conseguir a pontuação, e não a otimização possível para o contexto nacional.

Além de itens relacionados à infra-estrutura e à redução do impacto ambiental (como coleta e reuso de águas pluviais; provisão de espaço para separação de resíduos sólidos; uso de madeira certificada; materiais com baixa liberação de compostos voláteis; redução do entulho gerado na obra; entre outros), destacam-se características do modelo de edifício que contribuem para um aprimoramento do desempenho térmico e energético desses exemplos:

- Fachadas: especificação mais criteriosa de materiais; uso de vidros com menor fator solar (FS); wvrs entre 40% e 60%;
- Sistemas (geral): uso de sistemas mais eficientes, com menor consumo energético;
- Sistemas de condicionamento de ar: também mais eficientes; exemplos do tipo VRV (volume refrigerante variável); reaproveitamento da água da condensação; submetidos a testes para análise da qualidade do ar interno nos ambientes.

Outro ponto a ser destacado no processo de projeto desses edifícios é a realização de simulações computacionais anuais para avaliação e comprovação de desempenho dos sistemas e soluções empregados, similarmente ao constatado para os edifícios elencados do contexto internacional, sendo, aqui, decorrente dos requisitos da certificação. Entretanto, questiona-se como isso vem sendo feito. Apesar da crescente oferta de "certificadores", verificam-se hoje, no mercado nacional, poucos profissionais realmente aptos para tal, com devido conhecimento dos conceitos e teorias para poder operar as ferramentas de simulação computacional dinâmicas, as quais compreendem a avaliação anual do edifício, requerem complexa entrada de dados, e não dispõem de interface amigável<sup>79</sup>. *Como as soluções estão sendo simuladas? E a aplicação no edifício real, segue especificações e instruções, corresponde ao que foi simulado?* Cita-se como exemplo o posicionamento de vidros com coating de baixa emissividade (*low-e*) nas fachadas<sup>80</sup>.

Em meio a essa discussão, algumas iniciativas foram tomadas na direção da adaptação de selos/certificações internacionais para a realidade brasileira. Mencionam-se: a criação do GBC Brasil (*Green Building Council* Brasil), filiado à entidade americana USGBC, o qual está trabalhando desde o início de 2008 numa proposta de adaptação do LEED para o cenário nacional, a qual é esperada para início de 2010 (GBC Brasil, 2009), e o Processo AQUA – Alta Qualidade Ambiental, criado pela Fundação Vanzolini em 2007 com base na adaptação do HQE francês, o qual já possui cinco empreendimentos certificados e catorze processos em andamento (Fundação Vanzolini, 2009).

Sob esse panorama, evidencia-se a lenta evolução da arquitetura dos edifícios de escritórios atuais no país sob o ponto de vista do conforto ambiental e da eficiência energética com relação ao contexto internacional, e tendo em vista o potencial dessa arquitetura local. Contribui para isso a ausência de normas e regulamentações técnicas em vigor, ou o caráter obsoleto das existentes.

Enfatiza-se a situação da cidade de São Paulo, cujas condições climáticas mostram-se tão favoráveis à utilização de estratégias passivas nos edifícios. Com relação à

qualidade do ar em algumas partes da cidade, para os casos com problemas relativos a poluição e ruído, acredita-se que os projetos podem considerar medidas adicionais. Menciona-se o uso de filtros e “chicanas”<sup>81</sup> nas janelas, fachadas duplas ventiladas, e outros sistemas a serem testados e investigados. Entretanto, de acordo com o levantamento realizado por Andrade em um conjunto de edifícios operantes na cidade, a preocupação dos usuários quanto à qualidade do ar interno não está vinculada a presença de poluentes, e sim, ao fato de não existirem janelas operantes nos edifícios, causando insegurança (Andrade, 2005).

Contudo, acredita-se que o projeto de edifícios de escritórios mais eficientes termica e energeticamente para o Brasil requer uma revisão do modelo de edifício como um todo, repensando a forma; a configuração dos pavimentos tipo; a profundidade da planta e o pé direito livre interno; os materiais e os componentes empregados; as estratégias de condicionamento ambiental, controle e operação do edifício; e, em especial, a composição da fachada, como já observou Andrade (2005):

*É urgente, portanto, que os edifícios de escritório doravante construídos levem em consideração a pertinência do tratamento de suas fachadas de forma que seja minimizado o desconforto interno e maximizada sua eficiência energética, tendo como perspectiva melhores resultados ao longo de sua vida útil, aumentando a sua reputação e seu valor competitivo no mercado. (Andrade, 2005, p. 10.14)*

Os aspectos apontados são especialmente relevantes para viabilizar a incorporação de ventilação natural nos espaços de trabalho e maximizar seu alcance e sua eficiência, não bastando, apenas, a adoção de janelas operantes num modelo de edifício convencional, como verificado nos exemplos elencados do contexto internacional.

Contemplando os dezesseis principais edifícios de escritórios apresentados neste capítulo presentes em diferentes cidades do mundo, cabe ressaltar que nem todos eles pleitearam algum tipo de selo ou certificação de “edifício verde”, como observado com os quatro edifícios alemães comentados, os quais, ainda assim, mostram-se aprimorados para o desempenho energético e para o conforto ambiental de seus usuários.

Abrangendo os exemplos internacionais, observou-se que os edifícios que possuem um selo de green building partiram da premissa de atender no mínimo aos requisitos das certificações, e que essas são específicas para cada localidade de implantação. Com relação aos edifícios brasileiros, verificou-se o início do processo de pleitear selos ou certificações no país, com base na certificação norte-americana LEED<sup>82</sup>. Nesse sentido, o processo de projeto e construção dos ícones de edifícios de escritórios nacionais está se adaptando para essa nova realidade, na tentativa de cumprir os requisitos da certificação.

Finalmente, enfatiza-se o papel da existência de leis e regulamentações de desempenho térmico e energético para estabelecer requisitos, critérios e direcionar o projeto e a construção de edifícios de escritórios, de acordo com as limitações, demandas e condições climáticas específicas, além de impulsionar a produção de materiais e componentes com desempenho aprimorado pelas indústrias locais. Aliado à educação e conscientização dos usuários dos edifícios, para que realizem uma ocupação eficiente do ambiente e um uso racional dos recursos, e para que possam reivindicar condições adequadas de conforto ambiental nos espaços de trabalho.

[82] De acordo com dados divulgados pelo GBC-Brasil, em setembro de 2009 já havia 10 empreendimentos certificados no país, dos quais cinco correspondem à categoria CS – Core and Shell, a dizer: Edifício Cidade Nova – Rio de Janeiro – LEED CS 2.0 Certified; Eldorado Business Tower – São Paulo – LEED CS 2.0 Platinum; Rochavera Corporate Towers Torre B – São Paulo – LEED CS 2.0 Gold; Ventura Corporate Towers Torre Leste – Rio de Janeiro – LEED CS 2.0 LEED Gold; WT Nações Unidas 1 e 2 – São Paulo – LEED CS 2.0 Silver). (GBC-Brasil, 2009)



# Capítulo 2



## Cap 2. Métodos de Avaliação de Desempenho Térmico e Energético de Fachadas e de Edifícios de Escritórios

O desempenho térmico e energético de fachadas é tema de uma série de pesquisas e trabalhos recentes desenvolvidos em diversos países, além de estar presente em normas e manuais de recomendações de “boas práticas” de projeto. Com frequência, as fachadas aparecem vinculadas a tipologias de edifícios de escritórios em contextos climáticos específicos, e são avaliadas com diferentes ferramentas conforme o método empregado e a existência (ou não) de normas e regulamentações técnicas locais.

Tendo em vista o interesse crescente e a ampla adoção de fachadas duplas ventiladas em edifícios de escritórios num contexto global (Arons, 2000; Oesterle, 2001; Marcondes, 2004), verificou-se uma quantidade expressiva de estudos focados nesse sistema, o qual é relativamente novo, complexo, e apresenta inúmeras variantes, e cujo comportamento em edifícios em operação ainda aparece vinculado a uma lista de incertezas (Gratia e Herde, 2004a, 2007a, 2007c; Manz e Frank, 2007).

De acordo com o levantamento realizado nesta pesquisa, os critérios de conforto térmico estabelecidos para os usuários dos edifícios e/ou os critérios e indicadores de desempenho térmico e energético definidos para as fachadas ou para as edificações que as contém, (utilizados com maior frequência a partir de 2000), são apresentados a seguir, juntamente com as ferramentas e procedimentos empregados nos diversos métodos de avaliação.

### 2.1. Índices de Conforto

Na ausência de normas brasileiras para definir condições de conforto para usuários em edifícios de escritórios naturalmente ventilados, referências internacionais são utilizadas, tendo em vista a existência de normas e regulamentações para essa tipologia de edifício em diversos países.

Os índices tradicionalmente adotados são os propostos na norma ISO 7730 (2005) e na norma ASHRAE 55 (1992), anteriormente apresentados no item 1.1.1.1, onde é discutida a adoção de critérios de conforto para edifícios com atividade de escritórios. Ambos índices foram baseados em experimentos laboratoriais e abrangem o contexto de edifícios artificialmente climatizados.

No entanto, a versão atual da norma ASHRAE 55 (2004) propõe um método para aplicação em edifícios naturalmente ventilados, baseado num modelo adaptativo de conforto. O procedimento apresentado por esse método é baseado na definição de uma faixa de temperatura operativa de conforto, cujos limites estão vinculados às condições climáticas externas (vide explicação detalhada em 1.1.1.1).

Destaca-se a utilização da norma ASHRAE 55 (2004) para estudos de avaliação de desempenho térmico de edifícios de escritórios naturalmente ventilados. Inclusive em casos brasileiros, como em Figueiredo (2007) e como indicado pelo recente RTQ – *Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Público* (2009) (vide item 1.3.3 e item 2.2.1). De modo geral, o índice de conforto proposto pela norma ASHRAE 55 (2004) é aplicado em estudos comparativos, indicando a porcentagem de horas em conforto para cada caso avaliado. Poucos trabalhos estabelecem um critério ou limite aceitável para esse parâmetro, como em Yao et al. (2009), no qual é definido um critério mínimo de 80% das horas ocupadas do ano em conforto para a avaliação realizada.

[83] Versão eletrônica do documento disponível em: <[http://www.bfrc.org/pdf/Window%20Energy%20Rating%20\(EST%20March%202004\).pdf](http://www.bfrc.org/pdf/Window%20Energy%20Rating%20(EST%20March%202004).pdf)>.

[84] Versão eletrônica do documento disponível em: <[http://www.planningportal.gov.uk/uploads/br/BR\\_PDF\\_AD11A\\_2006.pdf](http://www.planningportal.gov.uk/uploads/br/BR_PDF_AD11A_2006.pdf)>.

## 2.2. Critérios e Indicadores de Desempenho Térmico e Energético

Verificou-se a existência de dois grupos ou categorias de indicadores de desempenho térmico e energético de fachadas: a primeira se refere ao elemento “fachada” isolado (ou a componentes do elemento); e a segunda abrange o desempenho do edifício em geral, tendo em vista a influência da fachada.

### 2.2.1. Normatização

No cenário internacional, diversos países possuem normas e regulamentações de desempenho térmico e energético para seus edifícios, com destaque para os europeus (vide item 1.2). As regulamentações e *standards* de países como a França, a Alemanha e a Inglaterra inicialmente utilizavam o parâmetro U (ou coeficiente de transmitância térmica, em  $W/m^2C$ ) para avaliar o desempenho térmico e energético das fachadas e seus componentes, com destaque para os vidros empregados, e portanto, inserem-se na primeira categoria de indicadores de desempenho anteriormente indicada. Nesses países, os requisitos de conforto térmico e eficiência energética são focados no período de inverno, primando-se pelo isolamento térmico das edificações.

Recentemente, com o aumento do rigor das normas de eficiência energética em alguns países, em sua maioria europeus e americanos, foram criados programas de avaliação e classificação do desempenho energético de janelas, os “*window energy rating programmes*” (Karlsson e Roos, 2004). Ainda parte da categoria de indicadores de desempenho do elemento “fachada”, tais programas apresentam um método mais abrangente de avaliação de desempenho do que as baseadas apenas no U, incluindo outros parâmetros. Em vigor nos Estados Unidos, Canadá, Reino Unido, Austrália e Nova Zelândia, entre outros países, no Reino Unido foi criado o *Window Energy Rating System (WERS)*<sup>83</sup>. O WERS é baseado em um “*rating*” ou classificação determinado por uma equação, a qual considera três variáveis: a transmissão de total de radiação solar (comumente chamada de *G value*), o *U value* e a infiltração de ar pelo componente. O resultado final é posicionado em uma escala de sete categorias classificadas de “A” até “G”, integrantes de um selo o qual é atribuído ao edifício, como ilustra a Figura 114. Tal método é utilizado para validar componentes com relação ao desempenho mínimo estipulado pelo código energético do país (*Building Regulations, Part L: Conservation of Fuel and Power, 2006*)<sup>84</sup>.

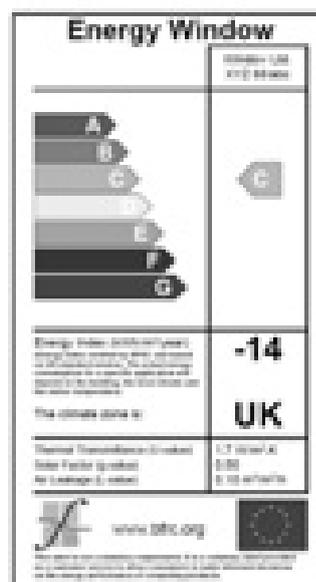


Figura 114. Selo do programa WERS, atribuído a edifícios no Reino Unido.

No que tange aos indicadores do desempenho da fachada, acredita-se que esses são importantes instrumentos para regular a produção da indústria de materiais, principalmente com relação à qualidade dos componentes de caixilhos e janelas. Certamente o uso desse tipo de indicador contribui para o aprimoramento da eficiência energética dos edifícios. Porém, algumas limitações podem ser apontadas, tendo em vista que a eficiência energética de janelas e fachadas depende de variáveis como o clima, a configuração e a orientação do edifício no qual são instaladas. Desse modo, o uso desse tipo de indicador não exclui a importância da realização de uma avaliação mais abrangente, focando no desempenho do edifício, como resultado dos elementos, parâmetros e variáveis que o compõe (tanto construtivos quanto relativos ao seu uso, ocupação e local de implantação) – seja para uma condição estática ou considerando um determinado período, numa condição dinâmica (procedimento de maior complexidade).

Nesse sentido, sabe-se que em países europeus como a Alemanha, a Holanda e o Reino Unido, e nos Estados Unidos, a adoção de indicadores do desempenho do elemento fachada aparece aliada a normas e regulamentações sobre o conforto térmico dos usuários, como a regulamentação europeia prEN 15251 (2005)<sup>85</sup>, e sobre o desempenho energético do edifício, como o *Part L do Building Regulations* no Reino Unido, já mencionado.

Abordando o contexto brasileiro, oito normas técnicas relacionadas ao desempenho de caixilhos estão em vigor (até o momento presente): NBR 10829 (1989), NBR 10830 (1989), NBR 6485 (2000), NBR 6486 (2000), NBR 6487 (2000), NBR 10820 (1989), NBR 10821 (2000) e NBR 10831 (1989) (ABNT). As normas em questão trazem parâmetros de infiltração de ar, estanqueidade à água, estabilidade, resistência estrutural e desempenho acústico, porém não abrangem questões de desempenho térmico e energético dos componentes.

Com relação ao desempenho térmico de fachadas de edifícios, a Parte 4 da norma NBR 15575 (*Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos — Desempenho. Parte 4: Sistemas de vedações verticais externas*), recentemente aprovada<sup>86</sup>, aborda o desempenho térmico de “sistemas de vedações verticais internas e externas (SVVIE)” para a tipologia de edificações residenciais com até cinco pavimentos. Esta norma estabelece critérios mínimos de desempenho térmico de fachadas a partir dos requisitos de conforto térmico para os usuários de acordo com o local de implantação do edifício, definidos na norma NBR 15220-3 (apresentada a seguir). Os critérios de desempenho térmico de fachadas estabelecidos para avaliar o desempenho térmico do edifício referem-se: às propriedades térmicas de transmitância térmica (U) e capacidade térmica de paredes externas (CT), ilustradas nas Tabelas 4 e 5; às áreas para aberturas de ventilação e ao sombreamento de aberturas. A NBR 15575 indica três métodos de avaliação para o item das fachadas, sendo o primeiro simplificado, com base em cálculos; o segundo por meio de simulações computacionais do edifício e o terceiro baseado em medições em edificações ou protótipos construídos. No final do processo deve ser emitido um relatório com os resultados da avaliação de desempenho, apresentando informações que caracterizem o edifício habitacional ou sistema analisado (ABNT, 2009).

Tabela 4. Transmitância térmica máxima de paredes externas (NBR 15220-3)

**Tabela 14 – Transmitância térmica de paredes externas**

Transmitância Térmica <sup>(1)</sup> U W/m <sup>2</sup> .K		
Zonas 1 e 2	Zonas 3, 4, 5, 6, 7 e 8	
$\alpha \leq 0,6$	$\alpha^{(2)} \leq 0,6$	$\alpha^{(2)} > 0,6$
$U \leq 2,5$	$U \leq 3,7$	$U \leq 2,5$
<sup>1)</sup> valores de transmitância térmica (U) considerando-se a resistência superficial interna com valor de 0,13 m <sup>2</sup> .k/w e a resistência superficial externa com valor de 0,04 m <sup>2</sup> .k/w. <sup>2)</sup> $\alpha$ é absorvância à radiação solar da superfície externa da parede.		

[85] A regulamentação prEN 15251 (2005) estipula a adoção da norma ISO 7730 (2005) como critério de conforto para edifícios artificialmente condicionados, e a equação proposta pela norma ASHRAE-55 (2004) como critério de conforto de verão para edifícios naturalmente ventilados (sem ventilação mecânica) (Pfafferott et al., 2007).

[86] A NBR 15575 está prevista para entrar em vigor em 12/06/2010 (Fonte: Informação divulgada na página eletrônica da ABNT: <<http://www.abnt.org.br>>)

[87] Considerando a aplicação das estratégias da NBR 15220-3 a edifícios de escritórios, acredita-se que a alta geração de carga térmica interna inerente a essa tipologia (decorrente da atividade realizada) exclui a adoção das recomendações "permitir sol durante o inverno" e "aquecimento solar da edificação".

Tabela 5. Capacidade térmica de paredes externas (NBR 15220-3)

Capacidade térmica (CT) kJ / m <sup>2</sup> .K	
Zona 8	Zonas 1,2, 3, 4, 5, 6
≥ 2,45	≥ 130

A NBR 15220-3 *Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social* (ABNT, 2005) divide o território brasileiro em oito Zonas Bioclimáticas, e estabelece estratégias de condicionamento térmico passivo para cada zona. A título de exemplo, as diretrizes construtivas para a cidade de São Paulo, a qual se encontra na Zona Bioclimática 3 da NBR 15220-3, são apresentadas nas tabelas a seguir (Tabelas 6 a 8) (ABNT, 2005) :

Tabela 6. Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas para a Zona Bioclimática 3 (NBR 15220-3, 2005)

Aberturas para ventilação	Sombreamento das aberturas
Médias	Permitir sol durante o inverno

Tabela 7. Tipos de vedações externas para a Zona Bioclimática 3 (NBR 15220-3, 2005)

Vedações externas
Parede: Leve refletora
Cobertura: Leve isolada

Tabela 8. Estratégias de condicionamento térmico passivo para a Zona Bioclimática 3 (NBR 15220-3, 2005)

Estação	Estratégias de condicionamento térmico passivo
Verão	J) Ventilação cruzada
Inverno	B) Aquecimento solar da edificação C) Vedações internas pesadas (inércia térmica)

Nota: Os códigos J, B e C são os mesmos adotados no método utilizado para definir o Zoneamento Bioclimático do Brasil (ver anexo B).

Cabe enfatizar que as diretrizes e estratégias da NBR 15220-3 são recomendadas para edificações de uso residencial, e sua elaboração considerou as exigências de conforto térmico para os usuários dessa tipologia. Ainda assim, acredita-se que tais diretrizes dão indício de algumas estratégias a serem aplicadas em edifícios em geral, tendo em vista as condicionantes climáticas de cada Zona Bioclimática, como a necessidade de sombreamento das aberturas, e a ventilação cruzada no verão<sup>87</sup>.

Com relação ao desempenho de edifícios de escritórios, a recente *Regulamentação para Etiquetagem Voluntária de Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos* (mencionada no item 1.3.3) foi criada em 2006 em caráter

voluntário, com previsão para vigorar em caráter obrigatório para os edifícios comerciais em meados de 2012. Em 2009, a regulamentação foi publicada com o título de *Regulamento Técnico da Qualidade (RTQ) do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Público* (MME, 2009). O RTQ apresenta “os requisitos técnicos necessários para a classificação do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviços e públicos, visando a etiquetagem voluntária, com foco na eficiência energética”, e pode ser aplicada tanto para o projeto de novos edifícios, quanto à edificações existentes. O desempenho térmico das fachadas do edifício é abordado em um dos três grupos principais de requisitos deste regulamento, a dizer: eficiência e potência instalada do sistema de iluminação, eficiência do sistema de condicionamento do ar e desempenho térmico da envoltória<sup>88</sup> do edifício:

*Há três grupos principais de requisitos que estabelecem o nível de eficiência energética: envoltória, sistema de iluminação e sistema de condicionamento de ar. Estes são avaliados separadamente, obtendo-se níveis de eficiência parciais cuja combinação em uma equação resulta em uma pontuação que indica o nível de eficiência geral da edificação. Há cinco níveis de eficiência, tanto para classificações parciais como para totais, e são: A (mais eficiente), B, C, D e E (menos eficiente).*

*As classificações parciais permitem a etiquetagem parcial dos sistemas (envoltória, iluminação e condicionamento de ar), que podem referir-se a parcelas do edifício. A classificação geral inclui todos os sistemas mais as bonificações e referem-se ao edifício completo ou a uma parcela deste. As etiquetas parciais referem-se à eficiência dos sistemas separadamente; a etiqueta geral é definida por uma equação que contém pesos para balancear a relação entre os sistemas. (MME, 2009, p.65)*

O RTQ pode ser aplicado tanto para edifícios artificialmente condicionados quanto para os naturalmente ventilados (ou “não condicionados”). Para os edifícios artificialmente condicionados são apresentados dois métodos de avaliação para a classificação do nível de eficiência energética: o método prescritivo e o método de simulação computacional. Para os edifícios naturalmente ventilados é utilizado o método de simulação.

O método prescritivo do RTQ é baseado na aplicação de uma equação fornecida para cada um dos três requisitos do regulamento. A equação representa um indicador de consumo, sendo estabelecidas diferentes equações conforme a Zona Bioclimática do edifício em avaliação, também seguindo o Zoneamento Bioclimático brasileiro estabelecido na NBR 15220-3 (ABNT 2005).

Já o método de simulação apresentado no RTQ pressupõe a construção de dois modelos de edifício:

*(...) um modelo real, com todas as características do edifício avaliado; e um modelo de referência, similar ao modelo real, com características de acordo com o nível pretendido. O modelo de referência deverá passar pelo método prescritivo, para determinação de alguns parâmetros deste modelo, conforme o nível de eficiência pretendida. Após determinadas as características dos dois modelos, real e de referência, os dois deverão ser simulados no mesmo programa de simulação, utilizando o mesmo arquivo climático. A partir dos resultados das simulações deve-se obter que o projeto proposto, modelo real, tem um consumo de energia anual igual ou menor que o edifício de referência para o nível pretendido.”(Ibid, p. 131)*

No método de simulação deve-se adotar um software que possibilite a avaliação do consumo energético do ambiente para as 8.760 horas de um ano, e utilizar uma

base de dados climáticos horários contendo 8,760 horas do ano para as variáveis temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar e ventos.

Para o caso dos edifícios naturalmente ventilados, o método de simulação computacional requer a especificação de uma hipótese de conforto a ser adotada para a avaliação do edifício, dentre duas opções indicadas: as normas ASHRAE Standard 55 (2004) ou ISO 7730 (2005) (apresentadas no item 1.1.1.1). Nesse caso, o critério considerado é a porcentagem do número de horas ocupadas dentro da zona de conforto (POC):

*Após a verificação da porcentagem do número de horas ocupadas dentro da zona de conforto (POC), deve-se consultar a Tabela 6.1 do RTQ-C para verificar o nível de eficiência de cada ambiente. Em seguida pondera-se os níveis encontrados em função da área dos ambientes, chegando ao EqNumV (Equivalente Numérico de Ventilação) que será utilizado para a obtenção da etiqueta geral do edifício. (Ibid, p. 138)*

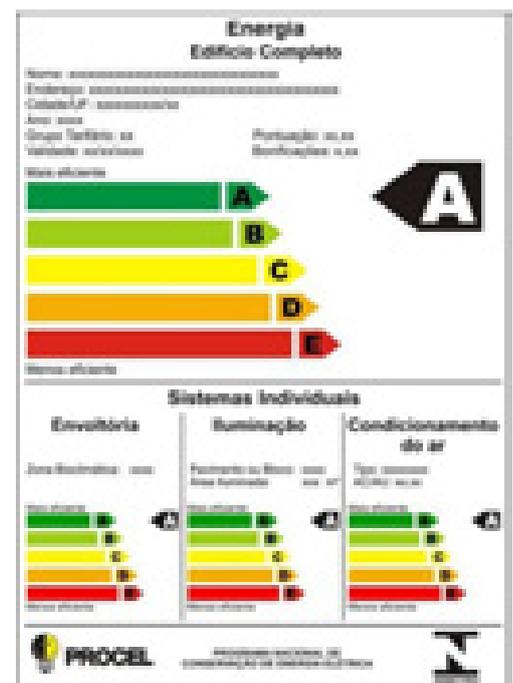
O nível de eficiência A é atribuído para ambientes com 80% das horas em conforto ou mais (Ibidem).

No entanto, “o processo de certificação realizado através da simulação não descarta o método prescritivo. Ele é utilizado para comprovar que, em certos casos, a utilização de parâmetros diferentes que os determinados no RTQ-C geram uma maior economia de energia, mantendo o conforto do ambiente” (Ibid, p.131).

Para ambos os métodos de avaliação do RTQ são estabelecidos pré-requisitos, em conformidade com a Zona Bioclimática do edifício. Como exemplo, os pré-requisitos para a Eficiência da Envoltória de uma edificação na cidade de São Paulo são: transmitância térmica máxima de paredes exteriores igual a  $3,7\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$ , e absorvância máxima de 0,4 para os materiais de revestimento externo das paredes (Ibidem).

Vale ressaltar que o procedimento para etiquetagem não define um limite superior para o nível A, e sim, um limite mínimo, ressaltando a possibilidade de obtenção de desempenhos mais elevados de eficiência energética. A etiqueta atribuída aos edifícios no final do processo é ilustrada na Figura 115. É possível observar sua semelhança com o selo do WERS inglês, anteriormente mencionado.

Figura 115. Exemplo de etiqueta do RTQ atribuída aos edifícios avaliados. A etiqueta é dividida em quatro partes: envoltória, sistema de iluminação, sistema de condicionamento de ar e a edificação (ou parte desta) (Fonte: MME, 2009)



Enfatiza-se o caráter inovador do regulamento RTQ, constituindo um dos primeiros passos em direção ao estabelecimento de um código energético nacional.

### 2.2.2. Critérios e Indicadores de desempenho térmico e energético propostos a partir de 2000

Parte da segunda categoria de indicadores elencada, a análise de desempenho de fachadas por meio da avaliação do desempenho do edifício (ou do ambiente adjacente à fachada) é abordada por vários autores e pesquisadores do tema. Os indicadores adotados com maior frequência na última década são listados conforme o objetivo e/ou a abordagem da avaliação:

Indicadores ou Avaliação de desempenho energético<sup>89</sup>:

- Consumo de energia elétrica total por área útil de escritórios, em KWh/m<sup>2</sup>/ano (Carmody et al., 2004; Poirazis, 2008)
- Demanda de pico em W/m<sup>2</sup> (Carmody et al., 2004)
- Consumo de energia elétrica para sistemas de condicionamento ambiental para resfriamento em Wh/m<sup>2</sup> (Pirró, 2005) e KWh/dia (Gratia e Herde, 2004a, 2004b, 2007a, 2007b)
- Carga térmica a ser retirada pelo sistema de condicionamento ambiental (para resfriamento do ar), em KW/mês e KW/ano (Benedetto, 2007)

Indicadores ou Avaliação de ventilação natural:

- Taxa de ventilação no ambiente, em volumes por hora (vol/h) (Gratia e Herde, 2004a, 2007)
- Distribuição do fluxo de ar no ambiente (Figueiredo, 2007)

Indicadores ou Avaliação de desempenho térmico:

- Temperatura de conforto:
  - temperatura operativa (ASHRAE 55, 2004) (Figueiredo, 2007; Yao, 2009);
  - temperatura efetiva (ASHRAE RP884, 1997) (Benedetto, 2007);
  - faixa de temperatura de bulbo seco e umidade relativa do ar (Marcondes, 2004)

## 2.3. Ferramentas de avaliação

A pesquisa realizada com base em referências recentes (a partir de 2000) evidenciou a utilização de três ferramentas (ou procedimentos) principais para a avaliação do desempenho térmico e energético de fachadas: câmaras ou *mock-ups* para ensaios físicos com modelos, desenvolvimento de modelos matemáticos específicos e, com maior frequência, simulações computacionais.

Com relação aos ensaios físicos, câmaras de testes laboratoriais permitem a análise dos fluxos de calor através da fachada, além de medições de temperaturas do ar e superficiais, realizadas em modelos físicos dos sistemas em escala reduzida ou escala 1:1. Como exemplo, mencionam-se a câmara existente na *School of the Built Environment* da Universidade de Nottingham, Inglaterra (Figuras 116 e 117), e a instalação experimental para ensaios de fachadas duplas ventiladas construída no Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), em Portugal, como parte do projeto

[89] Esses indicadores aparecem em estudos de edifícios artificialmente condicionados ou com condicionamento ambiental em modo-misto.

[90] Informação pessoal, mensagem eletrônica enviada à autora pelo engenheiro Fernando Marques da Silva, do LNEC, em 30 de janeiro de 2007.

da Agência Internacional de Energia (IEA) *Annex 44 - Integrating Environmental Responsive Elements in Buildings* (Informação pessoal)<sup>90</sup>, Figura 118.

Adicionalmente, ensaios em túnel de vento com modelos reduzidos de fachadas ou de edifícios permitem a análise do fluxo de ar através da fachada e a estimativa dos coeficientes de pressão em suas aberturas (Prata, 2005; Cóstola, 2006). A Figura 119 ilustra o túnel de vento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).



Figuras 116 e 117. *Mock-ups* para ensaio de componentes de fachadas na *School of the Built Environment* da Universidade de Nottingham, Inglaterra

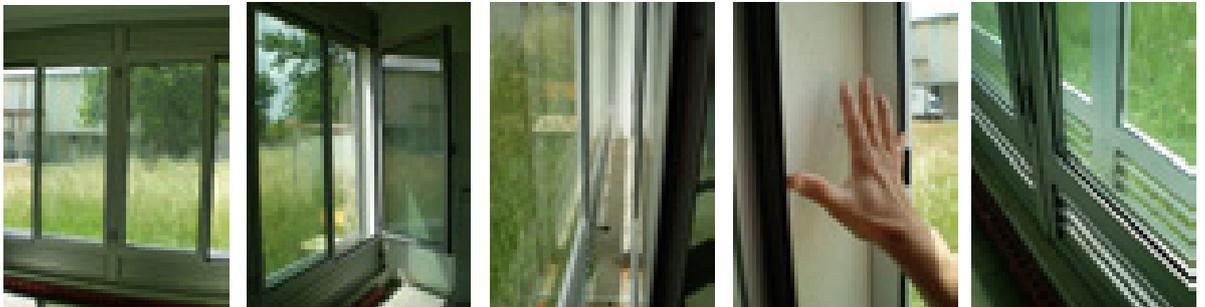


Figura 118. Instalação experimental para ensaios de fachadas duplas ventiladas no LNEC, em Portugal (Créditos: Alessandra Prata)



Figura 119. Túnel de vento do IPT em São Paulo para ensaios com modelos físicos (Créditos: Alessandra Prata)

Os resultados de medições laboratoriais com modelos ou protótipos podem constituir insumos para análises mais abrangentes com ferramenta de simulação computacional, ou ainda, podem ser utilizados como parâmetro de comparação e “calibragem”, ou seja, verificação da acuidade dos modelos de simulação computacional, como em Tascon (2006)<sup>91</sup>.

Parte de uma abordagem distinta, diversos modelos matemáticos são desenvolvidos por pesquisadores na tentativa de avaliar o desempenho de fachadas duplas ventiladas de modo acurado. Em função da complexidade e caráter dinâmico dos fenômenos físicos que ocorrem no interior desse tipo de fachada, principalmente relacionados a processos térmicos, ópticos e de dinâmica dos fluidos, destaca-se a dificuldade de predição do desempenho térmico e energético desses sistemas, como observado por Hensen (2002), o qual afirma não se tratar de um exercício trivial. Os modelos do tipo *Network* ou rede de nós são os mais mencionados (Poirazis, 2006), como o proposto em Balocco (2002)<sup>92</sup>, e não raro sua aplicação acontece de modo integrado a um software de simulação energética do edifício, como em Hensen (2002).

No entanto, destaca-se a ampla utilização de ferramentas de simulação computacional como parte dos métodos de avaliação de fachadas, abordando desde o desempenho do elemento e de algum sistema construtivo específico, até a análise do comportamento energético da edificação e seus sistemas de modo integrado.

Parte de uma ciência relativamente nova no processo de projeto e construção de edifícios, os programas para simulação de desempenho térmico e estimativa do consumo energético surgiram na década de 1970 (Westphal, 2007). Atualmente, uma vasta gama de *softwares* está disponível no mercado<sup>93</sup>.

Dentre as vantagens do uso desse tipo de ferramenta estão a velocidade conferida aos testes de diversas soluções e os recursos de visualização dos resultados. Enfatiza-se, também, a existência de alguns programas que permitem uma análise dinâmica das situações e ambientes avaliados, considerando as trocas energéticas ao longo de um dado período (até o ano todo) e a influência dos resultados sequenciais (Marcondes e Umakoshi, 2007).

Abrangendo diferentes níveis, pode-se dizer que, de modo geral, os programas de simulação computacional para avaliação do desempenho térmico e energético de edifícios são ferramentas complexas, as quais exigem uma extensa entrada de dados, e, com frequência, não apresentam interfaces amigáveis. Nesse sentido, a aplicação de tais ferramentas, suas potencialidades e limitações são constantemente investigadas (tendo em vista sua aplicação para tipologias de edifícios e/ou a contextos climáticos específicos), inclusive comparativamente entre elas, como realizado por Crawley et al. (2005)<sup>94</sup> e Vittorino et al. (2006)<sup>95</sup>.

Especificamente com relação às fachadas duplas ventiladas, Erhorn (2007) atesta que a predição do comportamento térmico e da eficiência energética desse tipo de sistema, com ênfase para as fachadas cuja cavidade é naturalmente ventilada, só é possível com o uso de ferramentas de simulação computacional complexas que permitem a interação entre dinâmicas de fluidos, balanços energéticos e mecanismos de transporte óptico.

Tomando-se como base os trabalhos e pesquisas elencados, e considerando a predominância de estudos sobre a aplicação de fachadas duplas ventiladas, mencionam-se os programas Esp-r (ESRU, 2002), TRNSYS (2000), Energy-Plus (2008) e TAS (2009) como os utilizados com maior frequência atualmente para simulações de desempenho térmico e energético de edifícios. Já com relação à investigação dos processos de ventilação, destaca-se a utilização de programas de simulação de dinâmica de fluidos ou *Computer Fluid Dynamics* (CFD), como o CFX (2005), para a análise dos fluxos de ar através de fachadas e sua distribuição no interior das edificações.

Essas ferramentas são apresentadas a seguir, com destaque para o programa TAS

[91] O autor realizou estudos paramétricos com um modelo de fachada dupla ventilada em escala 1:1 em câmara laboratorial, visando analisar o comportamento do sistema na condição de verão. Posteriormente, comparou os dados dos ensaios com simulações computacionais de um modelo que incluía a fachada e o ambiente adjacente com software de dinâmica de fluidos ou CFD (Tascon, 2006).

[92] Este trabalho propõe um modelo de balanço de energia em condição estática, no qual as equações são resolvidas pelo método dos elementos finitos com procedimento interativo (Balocco, 2002).

[93] O Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE) possui um diretório de ferramentas computacionais para avaliações de desempenho de edifícios, no qual é disponibilizada uma lista com 345 dessas ferramentas, trazendo informações detalhadas sobre suas potencialidades de aplicação e limitações (<http://www.energytoolsdirectory.gov/>).

[94] É apresentado um relatório com detalhes de vinte programas de simulação energética de edifícios (Crawley et al., 2005)

[95] O artigo apresenta os resultados da medição de variáveis climáticas realizadas em um protótipo de edifício habitacional construído na cidade de São Paulo, comparativamente aos resultados obtidos com a simulação de um modelo representativo deste protótipo nos programas TAS e EnergyPlus (Vittorino et al., 2006)

[96] O TAS completou os testes de desempenho de fachada e de sistemas de condicionamento ambiental (HVAC) requisitados pela norma ASHRAE 140-1 (2004) e foi recentemente validado pela Secretaria de Estado do Reino Unido como modelo de simulação dinâmica para o cálculo do desempenho energético de edifícios pertencentes à regulamentação energética do país - regulamentação 17A do "Building Regulations 2000" (Informação disponível em: <<http://www.edsl.net/main/Software/Validation/ASHRAE.aspx>>, acesso em 04 de novembro de 2009). Somado a isso, o programa TAS tem sido uma importante ferramenta de estudos analíticos sobre desempenho ambiental de edifícios em instituições de ensino e pesquisa na Europa, tais como a Architectural Association Graduate School, o Martin Centre da Universidade de Cambridge e outras, na última década. Do mesmo modo, o TAS tem sido utilizado para avaliações de desempenho térmico de alguns dos principais projetos de arquitetura aclamados como "sustentáveis" desde o início da década de 90, tais como a sede do Commerzbank em Frankfurt, o edifício da Swiss Re em Londres e a Assembléia Nacional do País de Gales, dentre outros. (Gonçalves, 2003).

(2009), o qual foi utilizado nas avaliações de desempenho térmico de edifícios de escritórios da presente pesquisa (vide capítulo 4).

O ESP-r é uma ferramenta de modelagem para a simulação integrada do desempenho térmico, visual e acústico dos edifícios, associados com os sistemas de condicionamento ambiental e materiais de construção, além da avaliação do uso de energia e emissões de gases. O ESP-r é um programa de simulação transiente baseado na técnica de volumes finitos, no qual podem ser modelados fluxos de calor, ventilação, umidade e energia elétrica. O programa foi projetado para o sistema operacional Unix, com implementações para Solaris e Linux, e é disponibilizado sob uma licença aberta. (ESRU, 2002). Ferramenta adotada por Dickson (2004) e Hoseggen et al. (2007).

TRNSYS (2000) é um programa de simulação dinâmica do desempenho energético de edifícios, realizando a modelagem sistemas transientes com uma estrutura modular. Nesse programa, o usuário pode especificar os componentes que constituem o sistema e a maneira pela qual eles estão conectados. O TRNSYS possui uma biblioteca com componentes comumente encontrados em sistemas de energia térmica e elétrica, bem como rotinas de componentes para manipular a entrada de dados meteorológicos ou a saída dos resultados da simulação. A adição de modelos matemáticos é possível no programa, devido a sua natureza modular. A ferramenta em questão foi desenvolvida para análises detalhadas de qualquer sistema cujo comportamento é dependente da passagem do tempo (TRNSYS, 2000). Software utilizado em Saelens et al. (2008) e Haase et al. (2009)

O EnergyPlus (2008) é um programa de simulação térmica e energética de edifícios desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos a partir da fusão dos programas BLAST e DOE-2, para a simulação integrada de edifícios e sistemas (Crawley et al., 2005). O Energy Plus é um software de uso gratuito (*freeware*), cujo *download* é disponibilizado na página eletrônica do Diretório de Eficiência Energética e Energia Renovável (EERE) do Departamento de Energia dos Estados Unidos: [www.energyplus.gov](http://www.energyplus.gov). Como exemplo, menciona-se sua adoção por pesquisadores brasileiros, como Pirró (2005) e Figueiredo (2007).

O CFX é um exemplo de CFD que estuda a dinâmica dos fluxos de fluidos e/ou fluxos de calor em ambientes ou superfícies, além da interação entre fluxos internos e externos. Após a simulação é possível obter-se como resultado uma imagem 3D do modelo e uma análise gráfica. O programa utiliza as equações fundamentais de conservação de massa, conservação de momento, conservação de energia, e equações para turbulência, e permite que o usuário insira outras equações específicas para as diversas variáveis (Marcondes e Umakoshi, 2007). Exemplo de aplicação: Figueiredo (2007).

O programa TAS (*Thermal Analysis Simulation*)<sup>96</sup> permite a realização de simulações computacionais avançadas de termodinâmica. Este software "Possui boa reputação em relação a sua robustez e uma ampla gama de capacidades." (Vittorino et al., 2006). O TAS cria uma rede de pontos ou "nós" interligando todas as zonas ou ambientes de análise, considerando um "nó" por zona. O programa realiza balanços horários entre as trocas térmicas nos diversos ambientes do edifício, simultaneamente, através de um conjunto de equações cujos resultados finais são expressados em termos de temperaturas do ar, temperaturas superficiais e cargas térmicas nos ambientes. A resposta do cálculo horário de cada "nó" ou ponto da rede é considerada para o cálculo dos demais e para o cálculo do momento seguinte.

Como parte do balanço térmico, o cálculo da condução no edifício é realizado por um método derivado do "Método dos Fatores de Resposta da ASHRAE", o "normal co-ordinate method". O método em questão calcula as trocas de calor e temperatura através de paredes, piso, teto e demais componentes do edifício realizando uma interpolação linear com base no histórico das temperaturas superficiais (internas e externas) desses componentes nos momentos anteriores (Edsl, 2004, p.7).

Para o cálculo da ventilação natural o TAS cria uma "rede de nós" entre as aberturas do

modelo do edifício e simula todas as zonas ou ambientes simultaneamente. O banco de dados climáticos utilizado contém dados de velocidade e direção de vento para cada hora do ano de referência (8.760 horas). A combinação dos dados climáticos com os coeficientes de pressão fornecidos pelo programa permite o cálculo da variação na pressão exercida pelo vento em todas as aberturas externas e, portanto, as taxas de ventilação por ação dos ventos e suas direções são calculados para cada hora. Caso desejado, o programa permite a inserção de um arquivo contendo os coeficientes de pressão. Os efeitos de ventilação por efeito chaminé (ou por diferença de pressão) são, também, integrados à análise. É possível, ainda, simular a interação entre ventilação mecânica e ventilação natural, para ambientes em modo-misto de condicionamento ambiental.

No que se refere à modelagem geométrica, o software TAS possibilita o dimensionamento e o posicionamento detalhado de cada janela ou abertura em sua superfície, o que contribui para uma avaliação mais efetiva do desempenho de diferentes sistemas de fachadas com ventilação natural. A ferramenta em questão ainda permite o controle da operação de janelas com diferentes cronogramas e parâmetros de abertura ao longo do dia, variando de acordo com as condições climáticas externas e/ou internas. Esta gama de controles também é aplicada ao processo de interação entre os modos artificial e natural para a simulação de ambientes em modo misto de condicionamento ambiental.

A ferramenta TAS foi utilizada em Marcondes (2004), Gratia e Herde (2004a, 2004b, 2007a, 2007b) e Benedetto (2007), e foi adotada para as avaliações de desempenho térmico de edifícios de escritórios com ventilação natural no presente trabalho (vide capítulo 4).

## 2.4. Métodos Existentes

Mencionam-se alguns trabalhos e pesquisas no tema, todos utilizando simulações computacionais como parte do método de avaliação do desempenho dos edifícios e suas fachadas. Destaca-se, novamente, a predominância de estudos relacionados às fachadas duplas ventiladas.

O trabalho desenvolvido por Carmody et al. (2004) apresenta um método de avaliação comparativa de desempenho de diferentes sistemas de fachadas para edifícios a partir de critérios energéticos e de conforto térmico (vide item 2.2.2, anterior). Um modelo geométrico representativo de uma sala com climatização artificial é simulado no software DOE (USDOE, 1998) para seis climas diferentes de cidades norte-americanas (Figura 120). São testados: oito orientações, com tipologias de fachadas variando o wwr, o tipo de vidro e a presença (ou não) de elementos de proteção solar, externo e internos.

Estudos anteriores (Marcondes, 2004) analisaram o desempenho térmico de um edifício de escritórios hipotético sob o clima de São Paulo, comparando diferentes tipologias de fachadas duplas ventiladas (4 variantes) e fachadas simples (com apenas uma camada de vidro; 7 variantes), por meio de simulações termodinâmicas com o software TAS. Com base em resultados anuais de temperatura e umidade do ar para uma sala do modelo de edifício elaborado, avaliou-se a porcentagem de horas ocupadas em conforto e o período de ventilação natural possível para o ambiente com cada tipologia de fachada testada, em quatro orientações principais (Norte, Sul, Leste e Oeste). Parâmetros construtivos e de ocupação foram fixados nas simulações. A sala de escritório apresentava uma fachada principal (exposta) com aberturas altas e baixas, totalizando 30% da área da fachada. Totalmente envidraçada, esta fachada podia apresentar (ou não) elementos de proteção solar externos (no caso das fachadas simples) ou entre panos de vidro (para as fachadas duplas ventiladas) (Marcondes, 2004).

Gratia e Herde (2003-2007) apresentam um conjunto de trabalhos seqüenciais sobre a

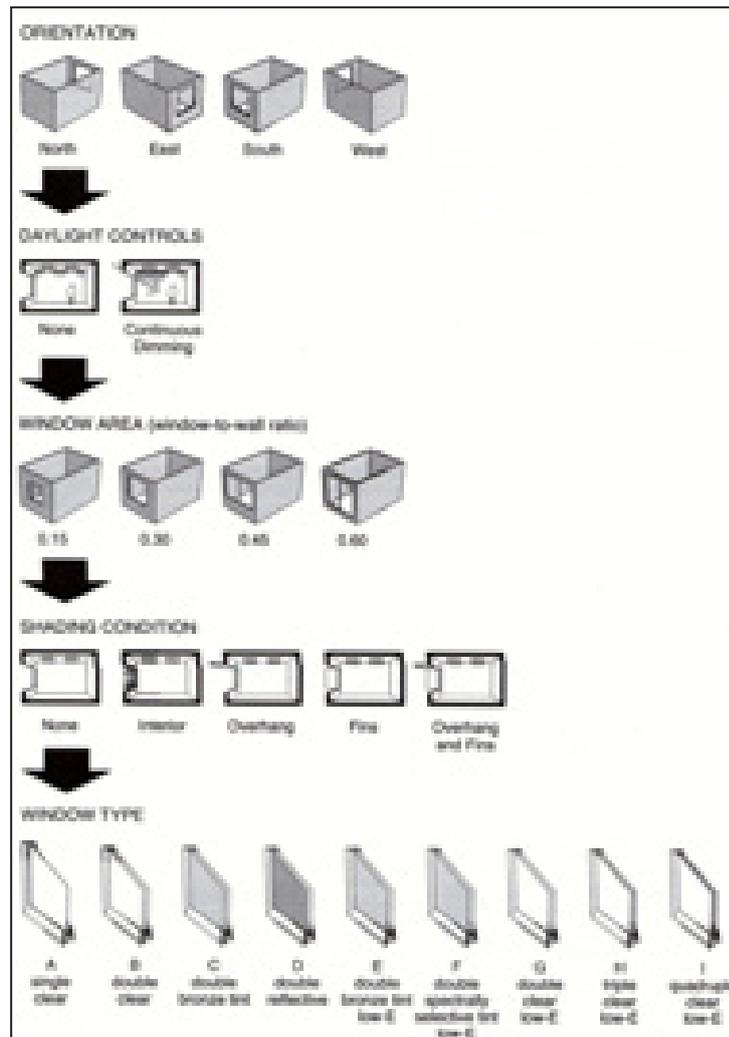


Figura 121. Modelo de edifício de estudo utilizado por Carmody et al. (2004), e parâmetros analisados (Carmody et al., 2004),

[97] O modelo de edifício proposto por Pirró (2005) é ilustrado no capítulo 3 deste trabalho.

aplicação de fachadas duplas ventiladas a edifícios de escritórios no contexto climático belga. O impacto dessa tipologia de fachada na ventilação natural e no consumo energético dos sistemas de condicionamento ambiental do edifício é analisado por meio de simulações computacionais de um modelo geométrico proposto pelo IEA SHC (Task 27, subtask A; mencionado a seguir) com o programa TAS. Do primeiro ao último estudo citado, maior complexidade é conferida aos parâmetros, variáveis e condições testadas. Inicialmente é realizada uma avaliação da fachada sob diferentes condições de exposição (orientação) e modos de operação (controles e aberturas), com análise da temperatura do ar e do fluxo de ventilação na cavidade de uma fachada dupla ventilada, para um dia de verão. Na sequência, diferentes tipologias de fachadas são testadas perante situações de condicionamento ambiental artificial e/ou ventilação natural do edifício, avaliando-se, agora, o desempenho do edifício quanto à carga térmica a ser retirada pelo sistema de refrigeração e a taxa de ventilação no ambiente. Posteriormente, uma avaliação comparativa entre edifícios com duas orientações, três níveis de isolamento térmico e diferentes tipologias de fachadas é realizada, testando-se uma ampla gama de controles e modos de operação inerentes a uma estratégia de condicionamento ambiental em modo-misto, e analisando-se a proporção de cargas térmicas para os períodos de climatização artificial.

Pirró (2005), em sua tese de doutorado, avalia o desempenho de diferentes tipologias de fachadas de edifícios de escritórios em São Paulo quanto ao seu impacto na carga térmica do interior do edifício a ser retirada por sistemas de condicionamento

ambiental. Um modelo geométrico de edifício<sup>97</sup> é simulado com o software Energy Plus para um ano de referência, testando-se diferentes orientações, wvrs, tipos de vidro e uso de proteções solares nas fachadas. São apresentados resultados comparativos de consumo de energia elétrica para operação do sistema de condicionamento ambiental, além de custos de instalação e operação, e custos de construção das tipologias de fachada analisadas.

Benedetto (2007), em sua dissertação de mestrado, analisa edifícios de escritórios sob condicionamento artificial e em modo-misto, comparativamente, em São Paulo e no Rio de Janeiro. São testados três modelos de edifício<sup>98</sup> com diferentes envoltórias, sendo avaliado seu desempenho em relação à carga térmica a ser retirada pelo sistema de refrigeração. Com um modelo geométrico de quatro andares, a autora realizou simulações termo-dinâmicas no software TAS, analisando os resultados de um pavimento-tipo intermediário para um ano de referência, com base de dados climáticos para as cidades de São Paulo e do Rio de Janeiro (Benedetto, 2007).

Figueiredo (2007) avalia a ventilação natural como possibilidade de estratégia passiva de resfriamento de edifícios de escritórios em São Paulo, como parte de sua dissertação de mestrado, em termos de temperatura operativa e distribuição do fluxo de ventilação do ambiente. Um modelo geométrico de edifício com vinte andares é simulado com o software Energy Plus, sendo avaliados resultados anuais do décimo pavimento em termos de temperatura operativa interna. Os valores de temperatura obtidos foram utilizados como dado de entrada para simulações de dinâmica dos fluidos com o software CFX (Ansys) para análise da distribuição do fluxo de ventilação no ambiente (Figura 121) (Figueiredo, 2007).

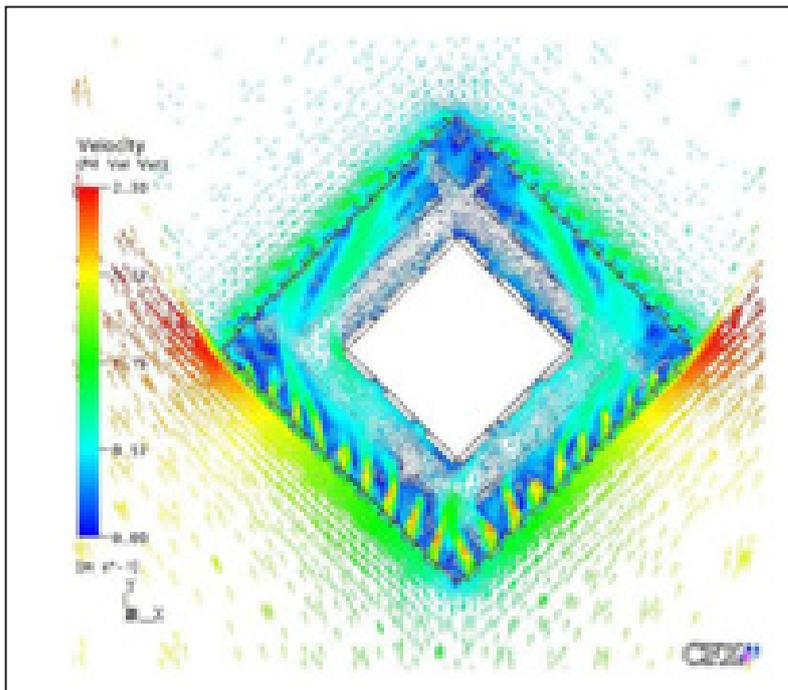


Figura 121. Resultado da simulação em CFD do modelo de escritórios estudado por Figueiredo (2007): vetores de velocidade do ar interna a 1,60m de altura (Fonte: Figueiredo, 2007)

Adicionalmente, cabe citar a iniciativa da União Européia no desenvolvimento de programas com o objetivo de investigar e avaliar o comportamento de sistemas inovadores e tecnologicamente complexos de fachadas, com ênfase para as fachadas duplas ventiladas, sob diferentes condições climáticas, como o SHC – *Solar Heating and Cooling Programme*, da Agência Internacional de Energia (IEA) e o BESTFAÇADE – *Best Practice for Double Skin Façades*<sup>99</sup>. Esses programas reúnem um conjunto de especialistas de universidades e instituições de pesquisa de diversos países.

[98] O modelo de edifício proposto por Benedetto (2007) é ilustrado no capítulo 3 deste trabalho.

[99] Informações sobre o programa e relatórios contendo parte dos resultados obtidos são disponibilizados em sua página eletrônica: <<http://www.bestfaçade.com>>

[100] “The objectives of Task 27 in the Solar Heating and Cooling Programme of the International Energy Agency are to determine the solar, visual and thermal performance of materials and components, such as advanced glazing, for use in more energy-efficient, comfortable, sustainable buildings, on the basis of an application-oriented energy performance assessment methodology; and to promote increased confidence in the use of these products by developing and applying appropriate methods for assessment of durability, reliability and environmental impact. (...) the energy performance of a window or façade element cannot be isolated from the performance of the building, with its occupants, environment and (HVAC) systems”. (Fonte: IEA Task 27 Brochure, material de divulgação do IEA Task 27, disponível em: <<http://www.iea-shc.org/task27/index.html>>, acesso em: 4 de abril de 2007)

[101] Informações sobre os programas são disponibilizadas em suas páginas eletrônicas: <<http://www.iea-shc.org/task27>>, e <<http://www.iea-shc.org/task34>>

[102] Bestfaçade WP4 Report “Simple calculation method”, disponível em <<http://www.bestfacade.com>> (Erhorn, 2007); “Double Skin Façades. A Literature Review”, disponível em <[http://www.iea-shc.org/publications/downloads/Task34-DoubleSkin\\_Facades\\_A\\_Literature\\_Review.pdf](http://www.iea-shc.org/publications/downloads/Task34-DoubleSkin_Facades_A_Literature_Review.pdf)> (Poirazis, 2006)

Como parte do SHC IEA, mencionam-se as subdivisões *Task 27 – Performance, Durability and Sustainability of Advanced Windows and Solar Components for Building Envelopes*<sup>100</sup> e *Task 34 – Testing and Validation of Building Energy Simulation Tools*<sup>101</sup>.

Ambos os programas trazem um levantamento e análise das ferramentas de simulação computacional e modelos matemáticos utilizados para o dimensionamento e a previsão o desempenho de fachadas duplas ventiladas em edifícios<sup>102</sup>, e culminam com a proposição de um modelo matemático cada, para avaliar o comportamento térmico e energético desses complexos sistemas.

## 2.5. Considerações Finais

A existência de normas e regulamentações de desempenho térmico e energético para edifícios em cada contexto ou país pressupõe o estabelecimento de critérios e métodos de avaliação compatíveis com as demandas específicas locais, considerando a realidade (e as possibilidades) urbanística, o padrão arquitetônico e construtivo, o potencial da indústria de materiais e componentes locais, entre outros. Desse modo, facilitando e/ou viabilizando a implementação de medidas para o aprimoramento de desempenho das edificações em larga escala.

Entretanto, a necessidade do desenvolvimento de projetos e da construção de edifícios mais eficientes energeticamente e com desempenho térmico aprimorado, mostrou-se fundamental para a realização de tais estudos, sendo observados casos em contextos ainda desprovidos desse tipo de legislação (como o brasileiro).





# Capítulo 3



## Capítulo 3. Edifícios de Escritórios: modelos de referência

### 3.1. Exemplos e Justificativas

Pretendeu-se definir modelos de referência de edifícios de escritórios com desempenho térmico e energético otimizado para as condições climáticas de São Paulo. Deste modo, tomou-se como ponto de partida a avaliação do clima ou diagnóstico climático da cidade, realizado no capítulo 1 da tese. Tal avaliação recomendou a estratégia da ventilação natural para obtenção de condições de conforto térmico nos edifícios na cidade por até 46,4% do ano, isoladamente, e por até 89,2% do ano, se combinada a outras estratégias passivas (Figura 16, Tabela 1).

De acordo com os objetivos da pesquisa, e atendendo à recomendação acima explicitada, outra característica necessária ao modelo de edifício é a possibilidade de ventilação natural do ambiente interno. Destaca-se a importância de aspectos da configuração e do dimensionamento do modelo de edifício como a profundidade máxima da planta e o pé direito livre interno para a eficiência e a maximização da estratégia de ventilação natural, o que, por sua vez, irá contribuir para o aprimoramento do desempenho térmico (e energético) da edificação.

A definição do modelo de estudo considerou aspectos arquitetônicos e parâmetros de ocupação presentes em:

- (a) exemplos de edifícios de escritórios nacionais e internacionais elencados no capítulo 1, aclamados como sendo ambientalmente conscientes e energeticamente eficientes para os contextos nos quais estão inseridos, e, em alguns casos, divulgados como proporcionando melhores condições de conforto ambiental aos usuários;
- (b) tendências e demandas do mercado imobiliário verificadas para edifícios de escritórios na cidade de São Paulo (capítulo 1);
- (c) trabalhos a respeito de edifícios de escritórios recentes, inclusive com levantamentos de campo e avaliação pós-ocupação (APO) de edifícios em São Paulo;
- (d) modelos de edifícios propostos para avaliação de desempenho térmico, energético e ventilação natural em estudos de referência no tema, apresentados no capítulo 2; e
- (e) manuais internacionais de recomendação de boas práticas projetuais; atendendo às normas e regulamentações nacionais vigentes, e, na ausência dessas, a normas internacionais.

Com relação aos edifícios de escritórios na cidade de São Paulo, as principais características identificadas nos exemplos existentes e tendências futuras para a tipologia no local, bem como na demanda do mercado imobiliário, estão relacionadas ao formato e ao tamanho da planta dos pavimentos tipo, sendo prioritariamente retangular ou quadrada, com *core* de serviços central, e apresentando áreas de aproximadamente 1.000m<sup>2</sup> - sendo cerca de 70% para os escritórios e 30% para o *core* de serviços. Dentre os exemplos recentes analisados, verificou-se que as plantas dos edifícios têm de 15m a 12m de profundidade máxima, e nenhum edifício possibilitava a ventilação natural do ambiente interno, aspecto de interesse para o presente trabalho (vide item 1.3.2.2).

Por outro lado, a possibilidade de ventilação natural dos escritórios foi detectada em oito dos edifícios comentados presentes no contexto internacional, a dizer: Commerzbank, em Frankfurt Am Main; Debis e GSW, em Berlin; Deutsch Post Office Tower, em Bonn; St. Marys Axe (Swiss Ree), em Londres; Aurora Place, em Sydney; CH2, em

[103] Uma síntese das características dos edifícios analisados que incorporam a ventilação natural é apresentada nas considerações finais do capítulo 1 da tese (item 1.4).

Melbourne; e Shiodome Tower, em Tokyo. Características verificadas nesses edifícios incluem: plantas menos profundas, fachadas elaboradas; elementos de proteção solar externos ou entre panos de vidro; elementos com inércia térmica expostos internamente; *cores* de serviços posicionados lateralmente (alinhados a uma ou mais fachadas) ou destacados do corpo principal do edifício; segmentação vertical; presença de átrios, “sky gardens” ou “skycourts”; entre outros aspectos ressaltados no capítulo 1<sup>103</sup>.

Já a respeito dos modelos propostos em estudos de referência no tema, mencionam-se as pesquisas desenvolvidas por Pirró (2005), Benedetto (2007) e Figueiredo (2007) para a tipologia de escritórios, sob as condições climáticas de São Paulo, e o conjunto de estudos de Gratia & Herde (2003, 2004a, 2004b, 2007), apresentados anteriormente no capítulo 2. Esses trabalhos possuem objetivos similares ao da presente pesquisa, isto é, avaliar o desempenho térmico, energético e/ou a ventilação natural de edifícios de escritórios e suas fachadas, utilizando ferramentas de simulação computacional.

Pirró (2005) elaborou um modelo de edifício baseado nos exemplos construídos na cidade de São Paulo entre os anos de 1980 e 2000, cujas características principais são: planta do pavimento-tipo de 35 m x 35 m, *core* central de 7 m x 7 m, profundidade máxima de 14m, pé direito livre interno de 2,70m, wwr variando de 50% a 90%, e presença ou não de proteção solar externa, Figura 122. O modelo não considera a abertura das janelas para ventilação natural, sendo o edifício artificialmente condicionado (Pirró, 2005).

Benedetto (2007) parte do modelo de edifício utilizado por Pirró (2005) e finaliza seu trabalho propondo um novo modelo com o objetivo de maximizar os períodos de condicionamento passivo ou ventilação natural do edifício de escritório analisado. O modelo proposto por Benedetto possui planta menos profunda, fachadas opostas mais próximas com distância máxima de 7,40 m para possibilitar a ventilação cruzada; pé-direito de 3,50m; ausência de forro, deixando a laje exposta para permitir trocas térmicas com a estrutura; e wwr de 50% com elementos de proteção solar externos às fachadas (Figura 123). Para os períodos de ventilação natural, o modelo contou com aberturas altas e baixas na parte opaca da fachada (Figura 124). Com o objetivo de avaliar o desempenho de um pavimento-tipo intermediário do edifício no software TAS (Edsl), a autora construiu um modelo geométrico de quatro andares, analisando os resultados para o terceiro (Benedetto, 2007). Um aspecto interessante do modelo elaborado pela autora é a descentralização das funções atribuídas a cada componente da fachada, estando as superfícies transparentes responsáveis por permitir acesso de luz natural para o interior do ambiente e por prover vistas ao exterior. Estando as aberturas para ventilação posicionadas na parte opaca da fachada, seu controle e operação são facilitados, não interferindo no posicionamento de elementos de proteção solar externamente às superfícies transparentes.

Já Figueiredo (2007) propõe um modelo de edifício com planta quadrada de 26,5 m x 26,5 m (área total de 702,25 m<sup>2</sup>), *core* central de 12,5 m x 12,5 m (com provisão de área para: 6 elevadores, escada, instalações sanitárias, copa, área técnica de informática e circulação), profundidade máxima da planta de 7 m, pé direito livre interno de 2,70m e wwr de 50% (Figuras 125 e 126). Janelas do tipo maxim-ar estão previstas em toda envoltória vertical do modelo de edifício, alternando-se um quadro fixo e um quadro móvel. O modelo geométrico utilizado nas simulações computacionais de desempenho térmico com o software Energy Plus possui vinte andares, sendo avaliado o resultado do décimo pavimento. (Figueiredo, 2007).

### 3.2. Caracterização arquitetônica e estratégias de conforto térmico

Com base nas informações anteriormente apresentadas, dois modelos de edifício de referência foram elaborados para as análises da pesquisa.

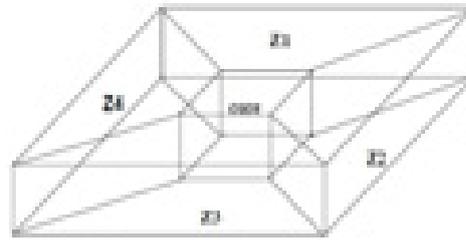
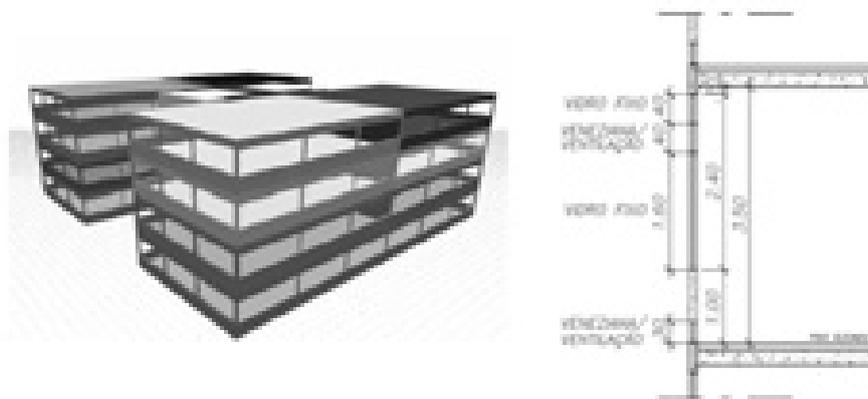
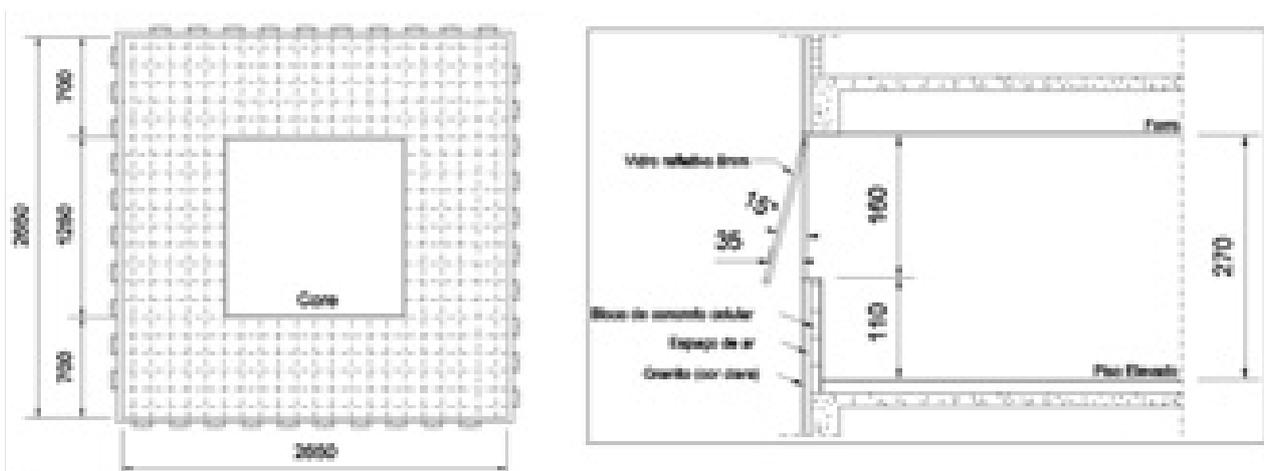


Figura 122. Modelo de edifício proposto por Pirró (2005): perspectiva do escritório de análise (Pirró, 2005)



Figuras 123 e 124. Modelo de edifício proposto por Benedetto (2007): perspectiva do edifício no programa de simulação, à esquerda; e detalhe da fachada de um pavimento tipo, à direita (Benedetto, 2007)



Figuras 125 e 126. Modelo de edifício proposto por Figueiredo (2007): planta e corte do pavimento tipo (respectivamente) (Figueiredo, 2007)

O primeiro deles, com forma quadrada e *core* central, segue os exemplos existentes e a tendência para edifícios de escritórios em São Paulo, com acréscimo de características para otimização do desempenho ambiental encontradas tanto nos modelos propostos por Benedetto (2007) e Figueiredo (2007), quanto nos exemplos de edifícios destacados do contexto internacional<sup>104</sup> (como a profundidade reduzida da planta, a presença de material com inércia térmica exposto internamente, etc); Figuras 129, 130 e 131.

Adicionalmente, desejou-se testar o desempenho de um segundo modelo de edifício sob as condições climáticas de São Paulo, como alternativa ao modelo tradicional de plantas praticamente quadradas e *core* central. Deste modo, o segundo modelo de referência proposto apresenta planta retangular menos profunda e *core* de serviços lateral, alinhado à fachada.

Com relação ao segundo modelo de edifício, além dos aspectos positivos de uma planta estreita do ponto de vista do conforto térmico e do desempenho ambiental e energético, como facilitar o acesso aos recursos naturais de iluminação e ventilação natural<sup>105</sup>, a adoção de dois modelos com formas distintas pressupõe maior flexibilidade de implantação em uma situação real, na adaptação a diferentes configurações de terreno.

O segundo modelo de edifício proposto parte de uma adaptação do primeiro modelo elaborado, mantendo-se as mesmas áreas de planta (tanto a área total quanto a área útil de escritórios) e as dimensões de pé direito interno e profundidade máxima, no intuito de facilitar a avaliação comparativa de desempenho entre eles. Nesse sentido, a principal diferença entre os dois modelos é quantidade de fachadas expostas à radiação solar e à incidência dos ventos, sendo quatro no modelo quadrado, com área total de fachada, por pavimento tipo, equivalente a 450 m<sup>2</sup> ( $AT_{\text{fach}}$ )<sup>106</sup>, e apenas duas fachadas no modelo retangular, totalizando 337,5 m<sup>2</sup>. No entanto, as fachadas dos dois modelos em questão vão influenciar área (de piso) e volume dos ambientes internos equivalentes.

Para adaptação do modelo quadrado ao retangular utilizou-se como referência adicional o modelo de edifício de escritórios proposto pelo programa da Agência Internacional de Energia IEA SHC Task 27<sup>107</sup> para simulações de desempenho de sistemas de fachadas em edifícios (vide item 2.4). O modelo elaborado pelo IEA SHC Task 27 foi utilizado por Gratia & Herde (2003, 2004a, 2004b, 2007) em um conjunto de estudos de desempenho térmico, energético e ventilação natural de edifícios de escritórios com diferentes tipologias de fachadas, inclusive fachadas duplas ventiladas, com a ferramenta de simulação computacional TAS (ferramenta com a qual foram desenvolvidas as avaliações da presente pesquisa; vide capítulo 4). O modelo em questão apresenta o formato de planta retangular mais estreita, com distância máxima entre as fachadas opostas de 15m, e configuração com *cores* de serviço laterais – características desejadas. O edifício em questão é conformado por sete andares, planta com layout celular nos pavimentos tipo e corredor central com quinze salas de escritórios de cada lado, como mostra a Figura 127.

Seguindo as premissas mencionadas, visando o aprimoramento do desempenho térmico do edifício e a eficiência da ventilação natural interna, o principal critério de definição da planta do pavimento tipo de ambos os modelos de estudo foi sua profundidade máxima ou a distância máxima da fachada, de 7,5m. No primeiro modelo, de planta quadrada, esse parâmetro se refere à distância do *core* central até a fachada; já no modelo de planta retangular e *cores* laterais, 7,5m é a distância máxima de qualquer ponto da área de trabalho até a fachada. Apresentando plantas mais estreitas com layout livre, os dois modelos de referência possibilitam a ventilação cruzada no interior do edifício.

Tendo em vista que os exemplos recentes de edifícios de escritórios brasileiros que clamam apresentar desempenho térmico e energético aprimorado (ícones da geração dos anos 2000) não apresentam janelas, a escolha pelo tipo de abertura a

[104] Salienta-se que cada edifício foi considerado em seu contexto específico, bem como os elementos e estratégias foram considerados conforme a condição para o qual foram projetados (por exemplo, para situações com elevada temperatura do ar, ou para períodos de inverno), com base nas condições climáticas e requisitos para a arquitetura locais.

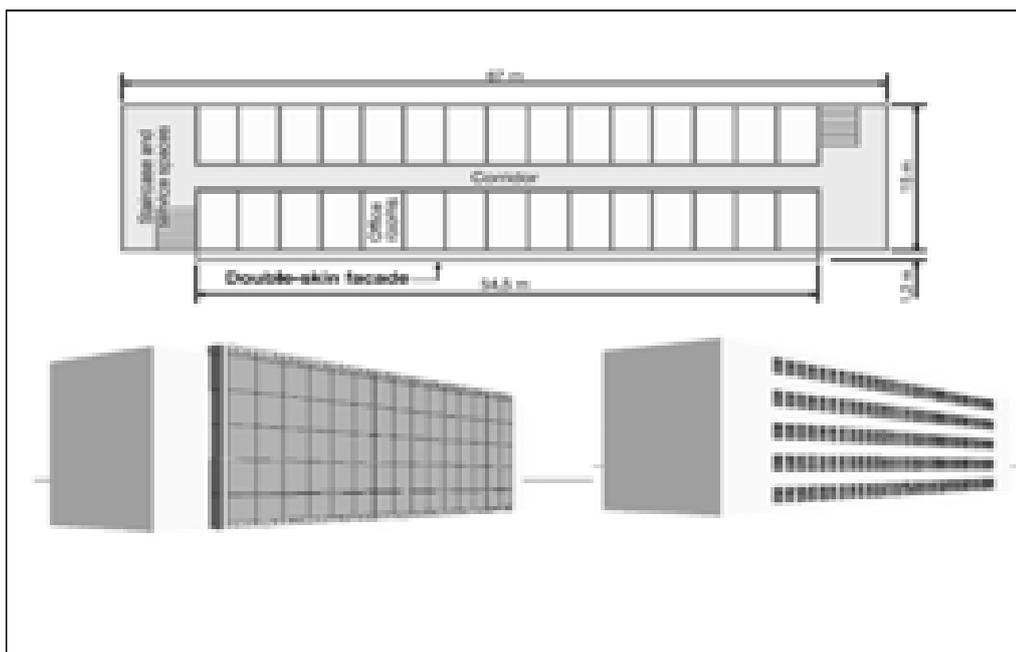


Figura 127. Modelo de edifício sugerido pelo IEA SHC T27 utilizado por Gratia & Herde (2004), adaptado para o contexto Belga: planta do pavimento tipo, acima; edifício de escritórios com e sem fachada dupla ventilada, respectivamente, abaixo.

ser considerada nos modelos de referência partiu da identificação dos tipos janelas mais convencionais empregados em edifícios brasileiros em geral e em exemplos internacionais de edifícios de escritórios com ventilação natural de seus ambientes.

Para os edifícios brasileiros, verificou-se a predominância da tipologia maxim-ar, inclusive adotada por Figueiredo (2007) no modelo de edifício que elaborou como sendo representativo dos edifícios de escritórios existentes na cidade de São Paulo.

Com relação ao contexto internacional, de acordo com os manuais ingleses de práticas de projeto CIBSE Applications Manual AM10 (2005) – *Natural ventilation in non-domestic buildings*, e CIBSE Applications Manual AM13 (2000) - *Mixed mode Ventilation*, as tipologias de janelas mais utilizadas em edifícios de escritórios naturalmente ventilados ou com a estratégia de condicionamento ambiental em modo-misto são as pivotantes (*centre-pivot*), horizontais ou verticais; as basculantes (*top-hung*) e as “de correr” verticais ou guilhotina (*vertical sliding sash*), Figura 128.

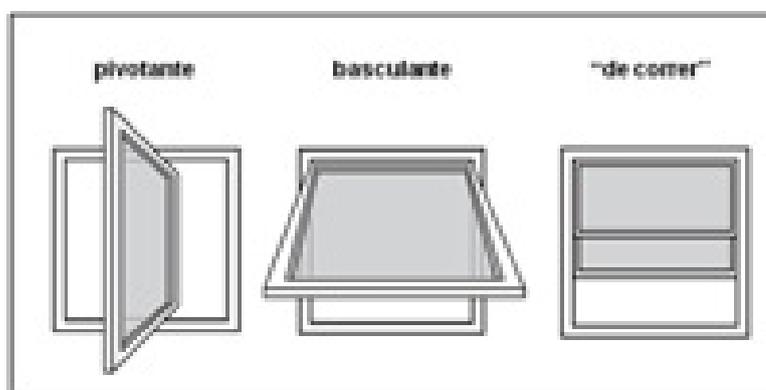


Figura 128. Tipos de janelas para edifícios de escritórios com ventilação natural (Fonte: CIBSE AM10, 2005, pág 26)

[105] Com base na avaliação das condições climáticas de São Paulo e demandas identificadas para a arquitetura de edifícios para esse clima, outros aspectos arquitetônicos e estratégia de projeto podem ser destacados, como por exemplo: o modelo possui apenas duas fachadas expostas à incidência de radiação solar, o que pode facilitar o controle dos ganhos de calor; o core pode ser posicionado na orientação mais desfavorável ou de maior ganho solar, com sombreamento e proteção da área de trabalho, entre outros (vide item 1.1.2).

[106] A área total de fachada pressupõe a somatória das superfícies opacas e transparentes das quatro fachadas da planta quadrada e das duas principais fachadas na planta retangular (adjacentes ao ambiente de escritórios), não sendo considerados os fechamentos dos cores de serviço para essa variável.

[107] *International Energy Agency, Solar Heating & Cooling Programme, Task 27: Performance of Solar Facade Components* <<http://www.iea-shc.org/task27>>.

Sabe-se que o dimensionamento e o posicionamento das aberturas e/ou janelas no ambiente influenciará o movimento de ar interno (Givoni, 1976; Melaragno, 1982), e numa escala menor, o fluxo de ar no ambiente (CIBSE LG10, 1999). A atribuição de duas janelas em uma mesma parede, sendo uma baixa e uma alta, tende a proporcionar um maior movimento de ar do que apenas uma janela centralmente posicionada, devido à diferença de pressão entre as duas aberturas. Já o posicionamento de aberturas em paredes opostas possibilita a ventilação cruzada no ambiente, com incremento da velocidade do ar interno.

A esse respeito, o manual CIBSE AM13 (2000) ressalta a frequente adoção conjunta de janelas baixas e altas em uma mesma fachada nos edifícios com modo-misto de condicionamento ambiental. Este fato amplia as possibilidades de configuração da ventilação do ambiente em diferentes períodos do dia ou ano, em conformidade com a flexibilidade e a gama de possíveis modos de operação inerentes a essa estratégia de condicionamento ambiental. Nos edifícios com essas características, é comum a atribuição de diferentes funções a cada janela, sendo as altas utilizadas isoladamente para ventilação noturna, ventilação higiênica em períodos frios ou para incrementar a ventilação do ambiente juntamente à janela baixa durante o dia. As janelas baixas, por sua vez, geralmente são maiores, utilizadas para ventilação diurna (ou seja, durante o período ocupado), e posicionadas centralmente (na linha da visão de pessoas sentadas), possibilitando maior controle e operação por parte dos usuários, e garantindo as visuais externas (CIBSE AM 13, 2000).

Com relação às aberturas para ventilação dos modelos de referência elaborados no presente trabalho, tendo em vista o acima mencionado, optou-se pela adoção de apenas um tipo de abertura por fachada, caracterizando uma condição inicial de ventilação natural a ser analisada no edifício, como parte das avaliações de desempenho termodinâmico do capítulo 4. Desse modo, dentre as opções levantadas, janelas do tipo maxim-ar foram atribuídas às fachadas de ambos os modelos de referência.

As características arquitetônicas dos modelos de edifício de referência elaborados neste trabalho são listadas a seguir, conforme ilustram as Figuras 129, 130 e 131. Essas características são comuns aos dois modelos de referência, em sua maioria, sendo feitas as devidas distinções quando pertinente.

- 1º modelo: edifício de forma quadrada;
- 2º modelo: edifício de forma retangular;
- Altura do edifício: 34,25m, composto por embasamento + 6 pavimentos tipo escritórios + cobertura ;

Características do pavimento tipo:

- 1º modelo: pavimento tipo de 30m x 30m e *core* central;
- 2º modelo: pavimento tipo de 60m x 15m e dois *cores* laterais;
- Área Total ( $A_T$ ) = 900 m<sup>2</sup>;
- Área útil de escritórios ( $A_{escr}$ ) = 675 m<sup>2</sup>;
- Profundidade máxima da planta de 7,5m (Gonçalves, 2003; Benedetto, 2007), para o caso de configuração de planta com layout livre; para o cenário de planta com layout celular a profundidade máxima dos escritórios é de 6,5m;

- Pé direito livre interno (pd): 3,00m (BCO Guide, 2000; Westphal, 2008); Esta dimensão atende ao pé direito mínimo de 2,50m estabelecido pelo COE-SP (1993) para os edifícios de escritórios<sup>108</sup>. Pé direito de piso a piso (pd<sub>T</sub>): 3,75m ;
- Layout interno livre;
- Laje de bloco de concreto nervurada, exposta (e=0,50m), para aumentar a inércia térmica do ambiente e atuar juntamente com a ventilação natural no aprimoramento das condições internas<sup>109</sup> (Arnold, 1997; Benedetto, 2007);
- Ausência de forro rebaixado;
- Piso elevado com carpete (vão de 0,20m + 0,05m de piso), para cabeamento, telefonia e outros sistemas;
- Parede isolante para os *cores* de serviço: painel de concreto com lã de rocha (e=0,25m, U=0,19 W/ m<sup>2</sup> ° C)
- Fachada:
  - Proporção de superfícies transparentes e opacas (wwr) de 50% (Benedetto, 2007; Figueiredo, 2007); valor de referência para novos edifícios em São Paulo os quais aclamam maior qualidade ambiental e energética. Tal parâmetro atende a Instrução Técnica do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo (IT) n°9 e ao Decreto Estadual 46.076/04, quanto à compartimentação vertical de edifícios, segundo os quais as fachadas devem possuir o mínimo de 1,20m de altura de material opaco (“elemento corta-fogo”) entre os pavimentos (“compartimentos distintos”), ou dispor de abas de no mínimo 0,90cm no prolongamento dos entrepisos.
  - Superfícies transparentes: vidro laminado incolor, 8 mm, sem sombreamento (TL=0,87, FS=0,80, CS=0,93)<sup>110</sup>;
  - Superfícies opacas: parede externa em bloco de concreto (e=0,2m, U=2,0 W/m<sup>2</sup> °C,  $\alpha = 0,3$ ); em conformidade com a transmitância térmica máxima e absorvância estipuladas pelo RTQ para os materiais de revestimento externo das paredes de edifícios em SP (vide item 2.2.1)
  - Janelas tipo maxim-ar na parte envidraçada das fachadas principais<sup>111</sup>, possibilitando ventilação cruzada, e considerando abertura efetiva máxima para ventilação natural de 30% (Figueiredo, 2007; CIBSE AM10, 2005; e CIBSE AM13, 2000)
  - No modelo quadrado, a área de cada uma das fachadas principais do pavimento tipo ( $A_{\text{fach}}$ ) é 112,5m<sup>2</sup>, e a área total das fachadas expostas ( $AT_{\text{fach}}$ ) é 450,0m<sup>2</sup>;
  - Para o modelo retangular:  $A_{\text{fach}} = 168,8\text{m}^2$ , e  $AT_{\text{fach}} = 337,5\text{m}^2$ .

[108] Edifícios pertencentes ao “Grupo B”, de acordo com o tipo de uso, conforme estabelecido no COE do Município de São Paulo (COE-SP, 1993).

[109] O uso de materiais com inércia térmica expostos aliado à ventilação do ambiente são estratégias apontadas no diagnóstico climático realizado para a cidade de São Paulo no capítulo 1 do trabalho.

[110] As siglas TL, FS e CS correspondem, respectivamente, aos valores de transmissão luminosa, fator solar e coeficiente de sombreamento do vidro.

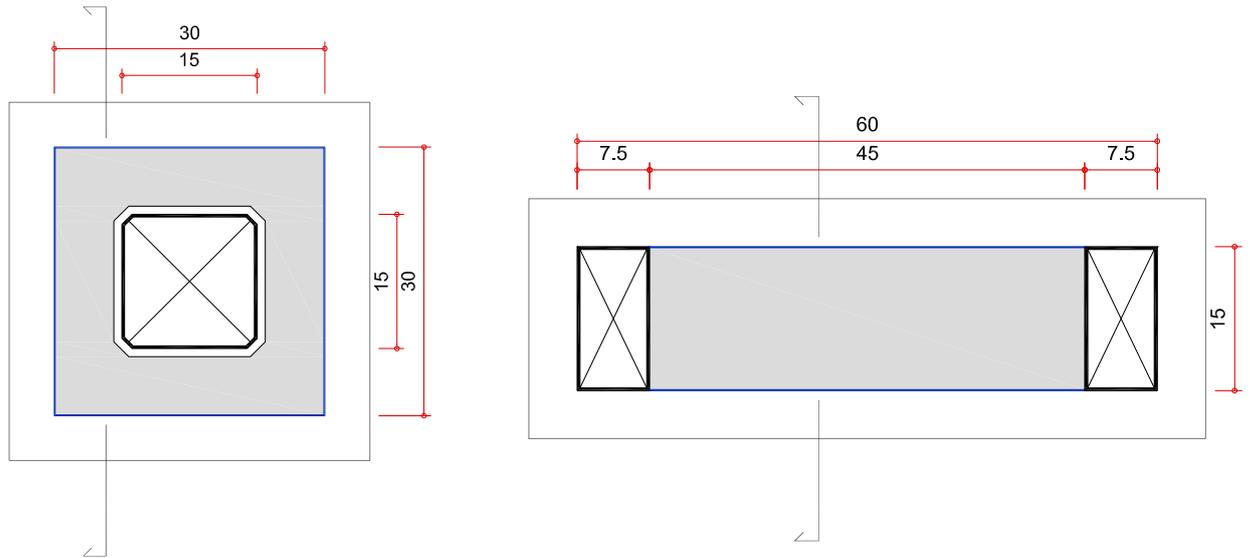


Figura 129. Modelos de edifício de referência, quadrado e retangular: planta dos pavimentos tipo

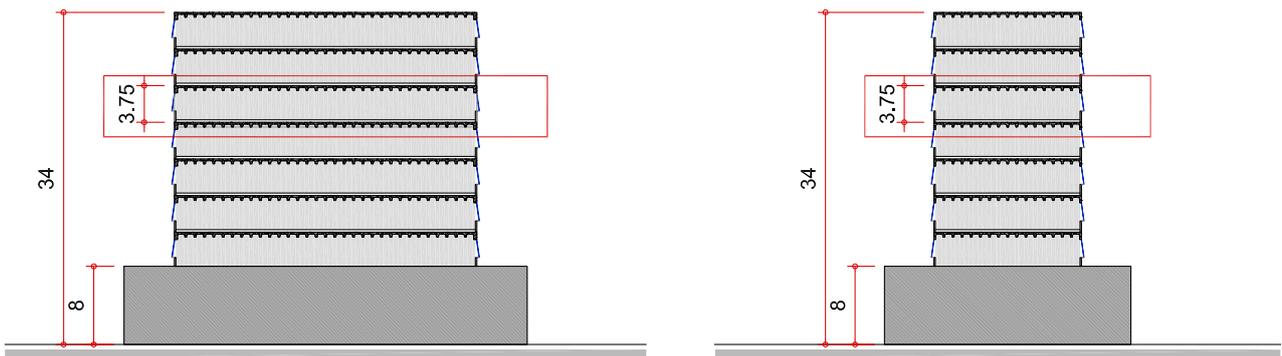


Figura 130. Modelos de edifício de referência, quadrado e retangular: corte dos edifícios

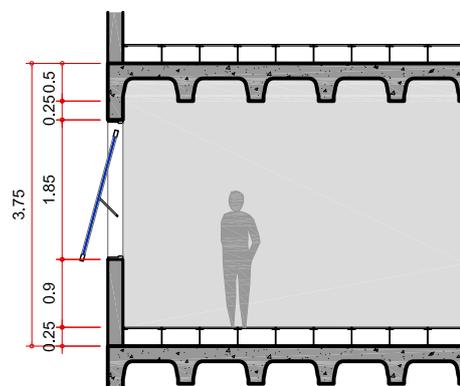


Figura 131. Modelos de edifício de referência: detalhe da fachada dos pavimentos tipo

### 3.3. Parâmetros de ocupação

Além das características arquitetônicas do edifício de escritórios como a configuração do pavimento tipo, principalmente em relação à profundidade da planta e ao pé direito interno, o padrão de ocupação do edifício exerce impacto direto em seu desempenho térmico e energético, e no conforto dos ocupantes.

Westphal & Lamberts (2007) destacam os fatores carga interna e padrões de uso como preponderantes no desempenho energético da edificação, ou seja, de alto impacto na geração da carga térmica total a ser retirada pela ventilação natural ou pelo sistema de condicionamento ambiental.

Em relação à densidade de ocupação, a norma brasileira NBR 9077 (2001) estipula um mínimo de 7m<sup>2</sup> por pessoa como dado para o cálculo da população a ser escoada, no dimensionamento de saídas de emergência para os edifícios de escritórios<sup>112</sup>. O mesmo parâmetro é recomendado pelo Código de Obras e Edificações do Município de São Paulo (COE-SP, 1993).

Uma avaliação quantitativa do perfil de ocupação de edifícios de escritórios recentes na cidade de São Paulo realizada por Andrade (2005) mostrou que a maior parte desses (63%) apresenta densidades variando entre 7m<sup>2</sup> a 10m<sup>2</sup> por pessoa, mas que existem exemplos com densidades maiores do que o estipulado pela norma NBR 9077 (2001) (ou seja, áreas menores do que 7m<sup>2</sup> por ocupante). Além do impacto da carga térmica gerada pelos ocupantes no desempenho térmico da edificação, pesquisas e levantamentos de campo em edifícios operantes apontam que a alta densidade de ocupação em edifícios de escritórios acarreta problemas de ruído e dificuldade de concentração dos usuários, o que por sua vez, afeta o bem-estar e a produtividade dos mesmos (Andrade, 2005).

No contexto europeu, sabe-se que o padrão de ocupação corrente dos edifícios de escritórios é baseado em densidades menores do que as praticadas em São Paulo. Tem-se como exemplo taxas de ocupação verificadas em edifícios ingleses correntes variando de 12 a 17m<sup>2</sup> por pessoa (CIBSE AM10, 2005).

Ainda com respeito aos edifícios na Inglaterra, país no qual a preocupação com desempenho ambiental e eficiência energética levou à especificação de normas e regulamentações técnicas, a Tabela 9 (Marcondes, 2004) ilustra a classificação de ganhos de carga térmica recomendada pelo *CIBSE Applications Manual (The Chartered Institution of Building Services Engineers, 1997)*, pelo *British Concil for Offices (BCO, 2000)* e pelo *BRE Environmental Design Manual (Building Research Establishment, 1994)*, para edifícios de escritórios ingleses.

Tabela 9. Ganhos internos de calor em escritórios (Marcondes, 2004)

cenário	ganhos “baixos”	ganhos “médios”	ganhos “altos”
peessoas	5-8	8-11	11-15
iluminação artificial	3 -5	6-9	10-14
equipamentos	0-6	6-12	12-20
<b>Total (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>6-16</b>	<b>18-30</b>	<b>30-50</b>

Yao *et al.* (2009) propõe valores semelhantes aos da Tabela 9 ao abordar a ventilação natural em edifícios de escritórios, considerando um total de 15 W/m<sup>2</sup> para um edifício com ganhos “baixos”, 25 W/m<sup>2</sup> para ganhos “médios” e 35 W/m<sup>2</sup> para ganhos altos.

[111] Janelas do tipo maxim-ar estão presentes nas superfícies envidraçadas das quatro fachadas do modelo de planta quadrada e nas duas fachadas principais do modelo de planta retangular.

[112] A norma NBR 9077 (2001) classifica os edifícios quanto a sua ocupação/uso. Os edifícios de escritórios abordados na presente pesquisa enquadram-se no Grupo D-1 “Escritórios administrativos ou técnicos” (ABNT, 2001).

[113] Ambos os casos pressupõe que o padrão do fluxo de ar permita a entrada de ar 'fresco' (externo) em cada espaço ocupado, e que isso ocorre sob uma ampla gama de condições (Etheridge & Ford, 2008).

[114] Na presente pesquisa, o edifício com estratégia de ventilação via uma única fachada corresponde ao modelo de edifício de escritórios com layout interno celular, variante a ser analisada no capítulo 4.

[115] Vide capítulo 1, item 1.2.

Tendo em vista uma adequação das demandas e realidades atuais dos cenários de edifícios de escritório mais eficientes térmica e energeticamente às possibilidades dos edifícios brasileiros, os parâmetros de ocupação utilizados nesta pesquisa foram definidos considerando-se um edifício “de ponta”, baseado em referências de edifícios de escritórios com menor consumo energético e preocupações com o conforto ambiental dos usuários, além do uso de equipamentos de alta tecnologia, como lâmpadas com consumo de energia reduzido e a utilização de *notebooks* no espaço de trabalho.

Sendo assim, para os modelos de referência da pesquisa adotou-se a densidade de uma pessoa a cada 10m<sup>2</sup>, com 140W de carga térmica emitida, sendo 75W referente à componente sensível, e 65W referente à componente latente (Frota & Schiffer, 1995). Com essa densidade, o ambiente de estudo (isto é, cada pavimento tipo do edifício com planta livre) comporta, no máximo, sessenta e sete pessoas. Para a iluminação artificial considerou-se 8W/m<sup>2</sup> de carga térmica nos espaços de trabalho, e 10 W/m<sup>2</sup> proveniente do uso de equipamentos. Desse modo, o cenário de carga térmica interna considerado nos modelos de referência resulta num total de 32 W/m<sup>2</sup>, como ilustra a Tabela 10.

Nota-se que os valores adotados na presente pesquisa equivalem aos cenários de ganhos “médios” e/ou ganhos “altos” de calor para um ambiente de escritórios de acordo com a Tabela 9, porém, apresentam-se desafiadores para a prática atual de edifícios de escritórios na cidade de São Paulo.

Tabela 10. Parâmetros de ocupação adotados para os modelos de referência

cenário	carga térmica (W/m <sup>2</sup> )
pessoas	14
iluminação artificial	8
Equipamentos	10
<b>Total (W/m<sup>2</sup>)</b>	<b>32</b>

### 3.4. Considerações Finais

Os modelos de edifício de referência elaborados correspondem ao tipo “isolado”, segundo classificação proposta por Etheridge & Ford (2008). Tal classificação divide os edifícios naturalmente ventilados em duas categorias conforme a estratégia de ventilação: isolados (*isolated*) ou espaços conectados (*connected spaces - single-cell building*)<sup>113</sup>.

A classificação em “espaços isolados” pressupõe a existência de ambientes considerados isolados, em termos de fluxo de ar, de outras partes do edifício. Para tanto, as aberturas para outras partes do edifício devem ser pequenas em relação às aberturas no envelope externo. No modelo “isolado”, as estratégias de ventilação são especificadas para cada pavimento separadamente, e podem ser via uma única fachada (*single-sided*)<sup>114</sup>, ou por meio da ventilação cruzada, via aberturas em diferentes fachadas. Já o edifício com espaços conectados ou edifício de célula única (*connected spaces - single-cell building*) refere-se à presença de grandes aberturas internas conectando diferentes espaços de um edifício, como os átrios ou “skycourts”<sup>115</sup>, o que efetivamente forma uma célula única, com o fluxo de ar através de qualquer abertura

dependente do fluxo de ar através das outras aberturas (Etheridge & Ford, 2008).

Verificou-se que cinco dos oito exemplos de edifícios de escritórios internacionais com incorporação de ventilação natural comentados no capítulo 1 enquadram-se na categoria de “espaços conectados”.

A esse respeito, com base no diagnóstico climático de São Paulo e em estudos anteriores (Marcondes, 2004) acredita-se que o modelo de edifício “conectado” pode ser uma solução eficiente de edifício de escritórios, tendo em vista o desempenho térmico para ventilação natural, conforme as condições estabelecidas neste trabalho. No entanto, devido a maior complexidade dos fenômenos físicos envolvidos, principalmente no que se refere aos fluxos de ventilação e aerodinâmica, e em virtude dos objetivos pretendidos relacionados ao impacto da fachada no ambiente interno, optou-se por não estudar tal modelo na presente pesquisa. Com um modelo de edifício do tipo “isolado” é possível isolar mais facilmente a variável fachada e avaliar suas influências no desempenho térmico da edificação e no conforto térmico de seus ocupantes.

Contudo, ressalta-se a validade e a relevância de investigar tipologias de edifícios “conectados” em estudos futuros do tema, bem como de outras configurações possíveis para redução da profundidade das plantas e obtenção das características desejadas, aqui explicitadas.



# Capítulo 4



## Capítulo 4. Caracterização de Desempenho Térmico de Edifícios de Escritórios com Ventilação Natural: Subsídios para o Projeto de Soluções de Fachada

Este capítulo apresenta e aplica um método de avaliação do desempenho térmico de edifícios de escritórios com ventilação natural, sob as condições climáticas da cidade de São Paulo.

Tomou-se como base os exemplos de métodos elencados no capítulo 2 e os modelos de edifícios de referência estabelecidos no capítulo 3. Os modelos de edifício apresentam projeto arquitetônico (dimensionamento e características construtivas) e padrão de ocupação (carga térmica interna) aprimorados para o desempenho térmico do escritório com ventilação natural.

Com base no método de avaliação proposto é estabelecida uma relação entre a vazão de ar possível e os ganhos de calor no ambiente através da fachada, tidos como dois dos principais parâmetros a influenciar o desempenho térmico dos edifícios de escritórios com ventilação natural. A partir desses parâmetros são gerados insumos para o projeto de soluções possíveis de fachadas para os edifícios de escritórios com ventilação natural na cidade de São Paulo.

### 4.1. Método de avaliação

O método proposto compreende o cálculo de uma vazão de ar de referência para cada cenário de análise estabelecido. Essa vazão de ar de referência é utilizada como dado de entrada para simulações computacionais anuais de termodinâmica de dois modelos de edifício de escritórios de referência com o software TAS. As simulações computacionais são realizadas com uma base de dados climáticos horários da cidade de São Paulo. Os edifícios de escritórios são avaliados conforme a porcentagem de horas ocupadas no ano em conforto, com base no modelo de conforto adaptativo da norma ASHRAE 55 (2004). A partir dos resultados das simulações computacionais são gerados insumos para o projeto de soluções de fachadas para os edifícios de escritórios com ventilação natural em São Paulo.

O método de avaliação proposto compreende as seguintes etapas:

1. Elaboração de modelos de edifícios de referência (“caso base”), incluindo características formais, construtivas e de ocupação otimizadas para o contexto a ser analisado - realizado no capítulo 3;
2. Definição do critério de desempenho para a avaliação do modelo de edifício de escritórios de referência;
3. Escolha de banco de dados contendo as principais variáveis climáticas do local de implantação do edifício, em base horária anual;
4. Definição dos cenários de análise;
5. Cálculo da vazão de ar de referência para cada cenário de análise estabelecido;
6. Realização de simulações anuais de desempenho térmico dos cenários de escritórios no programa TAS, com dado fixo de vazão de ar, calculado;
7. Extração dos resultados das simulações computacionais de um pavimento tipo de escritórios intermediário no edifício e cálculo da porcentagem de horas ocupadas do

ano em conforto; identificação das horas em conforto e, para essas horas, detecção do ganho de calor máximo pela fachada ( $Q_{f\text{máx}}$ ), por cenário.

A descrição dessas etapas e sua aplicação na avaliação de desempenho térmico de edifícios de escritórios com ventilação natural em São Paulo é realizada a seguir.

#### 4.1.1. Critério de avaliação

O critério adotado nas avaliações de desempenho térmico dos edifícios de escritórios é a temperatura operativa interna ( $T_o$ ), tendo-se como referência o modelo adaptativo de conforto da norma ASHRAE 55 (2004), apresentada no item 1.1 deste trabalho e comentada no item 2.1.

No modelo adaptativo da ASHRAE 55 (2004), faixas de temperatura operativa (ou temperatura de conforto) aceitáveis são definidas para o ambiente interno de edifícios naturalmente ventilados conforme a média das temperaturas do ar externo de cada mês e a porcentagem de usuários insatisfeitos, a partir da Figura 132.

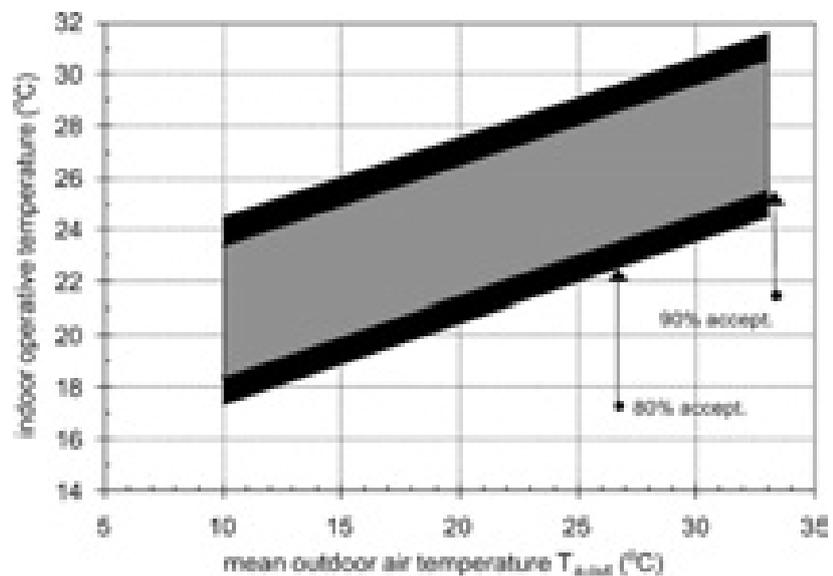


Figura 132. Faixas de temperatura operativa aceitáveis para ambientes naturalmente condicionados de acordo com a temperatura média mensal e a porcentagem de ocupantes insatisfeitos, proposta pela norma ASHRAE 55 (2004)

Como anteriormente indicado, a Figura acima pode ser definida pela equação:

$$OTn = 17,8 + 0,32 * tmm \quad \text{eq 4-1}$$

onde:

**OTn** é a temperatura operativa “neutra”

**tmm** é a média da temperatura mensal externa

Para avaliação anual das condições de conforto de um determinado ambiente, a temperatura operativa interna é comparada com os limites de conforto calculados para

as 8.760 horas do ano, a partir de um arquivo de dados climáticos do local. Considera-se que o ambiente está em conforto com, no máximo, 20% de pessoas insatisfeitas (o equivalente a, no mínimo, 80% de satisfeitos), quando as temperaturas operativas internas ( $T_o$ ) estão no intervalo  $(OT_n - 3,5^\circ\text{C}) \leq T_o \leq (OT_n + 3,5^\circ\text{C})$ , e 10% de insatisfeitos (ou um mínimo de 90% de satisfeitos) para o intervalo  $(OT_n - 2,5^\circ\text{C}) \leq OT \leq (OT_n + 2,5^\circ\text{C})$ .

Na presente pesquisa, considerou-se a faixa referente a 20% de usuários insatisfeitos para a definição das condições aceitáveis de conforto. Adicionalmente, estabeleceu-se que o **escritório deve apresentar um mínimo de 80% das horas ocupadas do ano em conforto** - ou seja, no mínimo 80% das horas ocupadas do ano devem estar em conformidade com as condições aceitas por pelo menos 80% dos usuários (RTQ, 2009<sup>116</sup>; Yao *et al.*, 2009).

[116] O regulamento brasileiro RTQ - Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Público estipulou uma porcentagem de horas ocupadas em conforto (POC) de no mínimo 80% para atribuição da etiqueta "A" a um edifício (MME, 2009), vide item 2.2.1.

[117] Dados sinóticos de aeroportos da América do Sul/METAR.

#### 4.1.2. Banco de Dados Climáticos da cidade de São Paulo

Os dados climáticos utilizados nas avaliações de desempenho são provenientes de uma base de dados da cidade de São Paulo elaborada por Benedetto (2007). Essa base contém dados de médias horárias de um ano de referência (8.760 horas): temperatura do ar, umidade relativa do ar, radiação solar, nebulosidade e velocidade e direção dos ventos, cuja montagem baseou-se em dados de clima de um período recente.

Benedetto utilizou uma base de dados de três anos para a construção do arquivo de clima: 2003, 2004 e 2005, seguindo método do LABAUT (2004). Frequentemente são utilizados bancos de dados de no mínimo 10 anos para avaliações de desempenho de edifícios, como proposto/observado por Akutsu (2005). Bases de dados comumente utilizadas em simulações computacionais de desempenho térmico e energético de edifícios provêm de arquivos como o do projeto SWERA, cuja obtenção é disponível na página eletrônica do Departamento de Energia Americano – EERE (*Energy Efficiency and Renewable Energy*, <http://www.eere.energy.gov/>). O arquivo do tipo SWERA é um arquivo TRY montado a partir de dados medidos de um período de 30 anos, de 1961 a 1990. No entanto, para o presente trabalho optou-se por utilizar a base de dados mais recentes elaborada por Benedetto (2007), tendo em vista a situação atual e as tendências futuras de mudanças climáticas, como o fenômeno de aquecimento global, cujos efeitos já são notados no mundo atualmente (vide a Introdução da tese).

Os dados utilizados por Benedetto (2007) foram obtidos a partir de três fontes: dados horários<sup>117</sup> de temperatura de bulbo seco, temperatura de ponto de orvalho, velocidade e direção de vento e pressão atmosférica, fornecidos pelo Laboratório MASTER do IAG/USP; dados de cobertura de nuvens obtidos no SYNOP, por meio do Laboratório MASTER; e dados de radiação difusa e global cedidos pela Plataforma Micrometeorológica do IAG, localizada na Cidade Universitária (46,733W 23,559S).

*Os dados de radiação global e difusa foram obtidos a partir da média dos dados horários de 2003, 2004 e 2005. Os dados de temperatura de bulbo seco foram obtidos a partir da média dos dados horários de 2003, 2004 e 2005.*

*A umidade relativa foi obtida pela relação entre temperatura de ponto de orvalho e temperatura de bulbo seco, conforme a seguinte equação:*

$$UR = e / es * 100,$$

onde:

$$e = 6.112 * \exp ((17.67 * td) / (td + 243.5))$$

$$es = 6.112 * \exp \left( \frac{(17.67 * t)}{(t + 243.5)} \right)$$

$td$  = temperatura de ponto de orvalho (°C)

$t$  = temperatura de bulbo seco (°C)

A direção do vento é sempre aquela a partir da qual sopra ao vento. Assim, um vento soprando do leste em direção ao oeste é descrito como vento leste. Medido no sentido horário a partir do norte verdadeiro, um vento leste é especificado como a 90°, um vento sul como a 180°, um vento oeste como 270° e um vento norte como a 360°. Um vento especificado como a 0° significa, segundo alguns autores, condições calmas. A rosa dos ventos apresentada a seguir mostra a frequência de ocorrência da média da direção e velocidade do vento em São Paulo nos anos 2003 a 2005 obtidos do laboratório METAR. A direção foi obtida pela média das direções de mesmo quadrante, ou das mais próximas entre si, a uma distância máxima de 90°. A média das velocidades relativas a tais direções gerou os dados horários de velocidade do vento do banco de clima. (Benedetto, 2007, p. 52-55), Figura 133

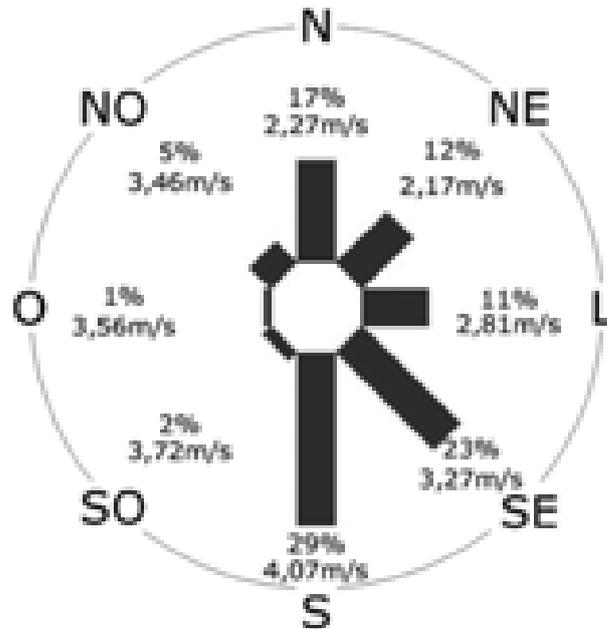


Figura 133. Frequência de ocorrência de direção e velocidade do vento ao longo do ano de referência para São Paulo (Fonte: Benedetto, 2007)

Gráficos ilustrativos dos dados de temperatura do ar (TBS), umidade relativa (UR), e radiação solar do ano de referência (médias horárias), a partir do banco de dados construído por Benedetto, são apresentados nas Figuras 134 a 136.

Tendo em vista o interesse do presente trabalho nas fachadas dos edifícios de escritórios, as Figuras 137 a 144 trazem gráficos de radiação solar diária no plano vertical em São Paulo, para as oito orientações principais, ao longo do ano; e a Tabela 11 resume os valores apresentados. Esses gráficos foram construídos no software Climaticus (Alucci, 2005) para a cidade de São Paulo, considerando a base de dados climáticos de São Paulo de Benedetto (2007).

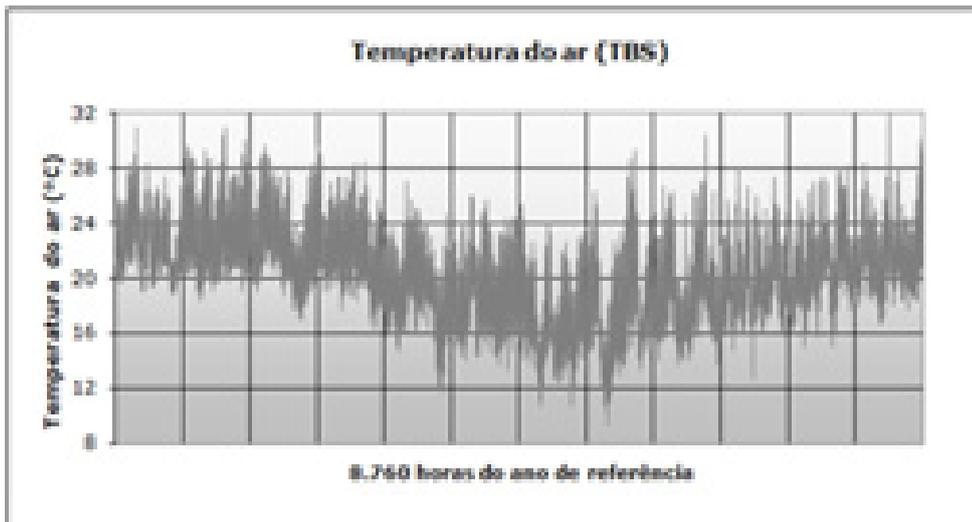


Figura 134. Gráfico de temperatura do ar (TBS) anual a partir da base de dados climáticos de São Paulo

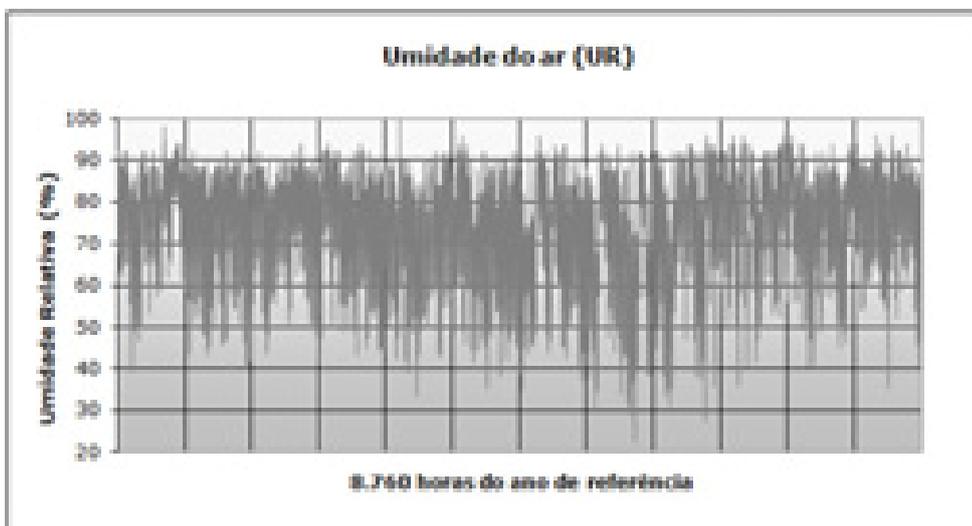


Figura 135. Gráfico de umidade relativa do ar (UR) anual a partir da base de dados climáticos de São Paulo

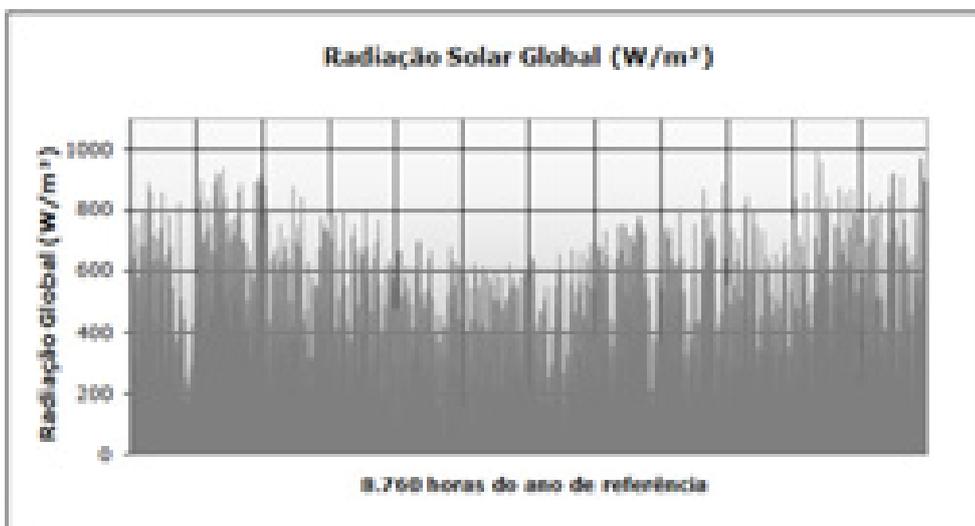


Figura 136. Gráfico de radiação solar global anual a partir da base de dados climáticos de São Paulo

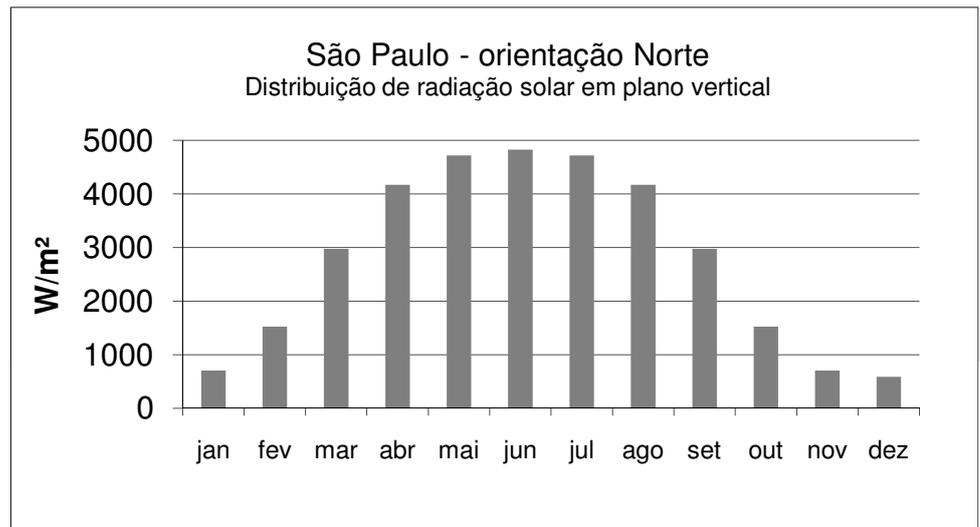


Figura 137. Distribuição de radiação solar global em plano vertical em São Paulo: orientação N (total diário)

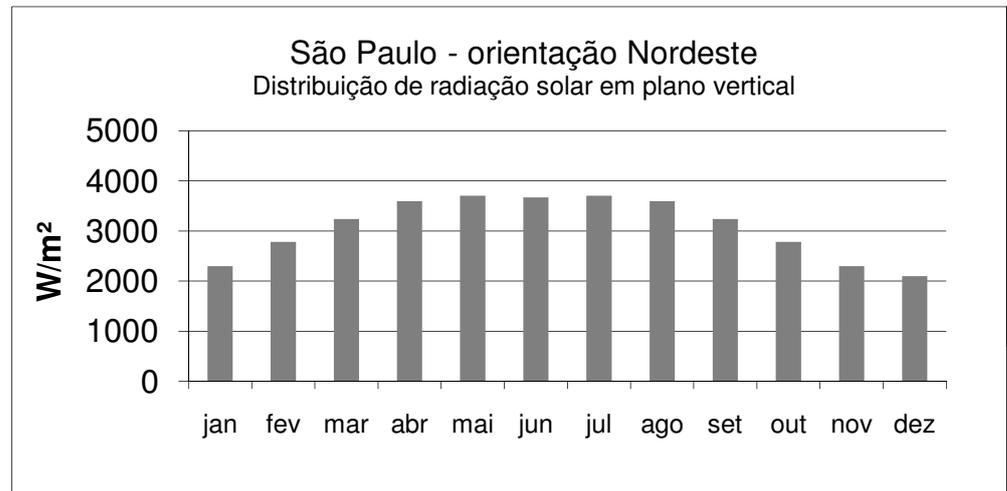


Figura 138. Distribuição de radiação solar global em plano vertical em São Paulo: orientação NE (total diário)

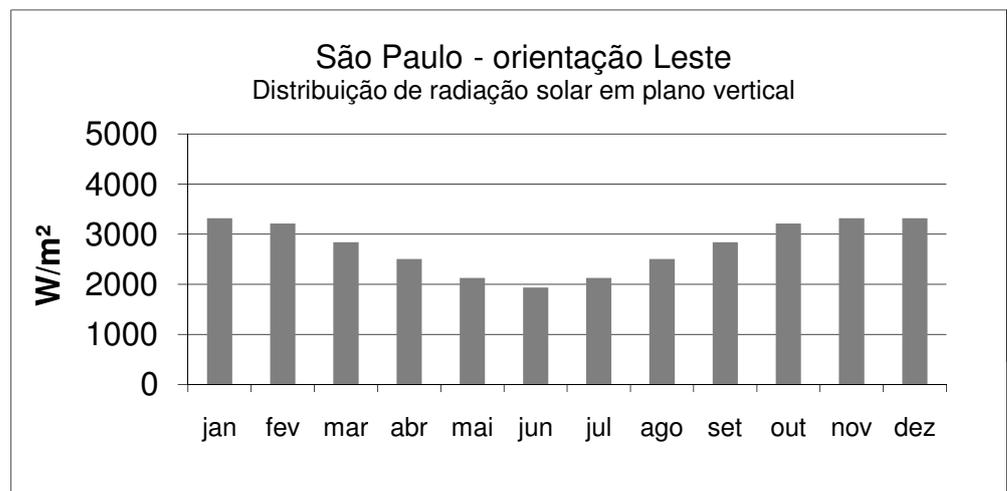


Figura 139. Distribuição de radiação solar global em plano vertical em São Paulo: orientação L (total diário)

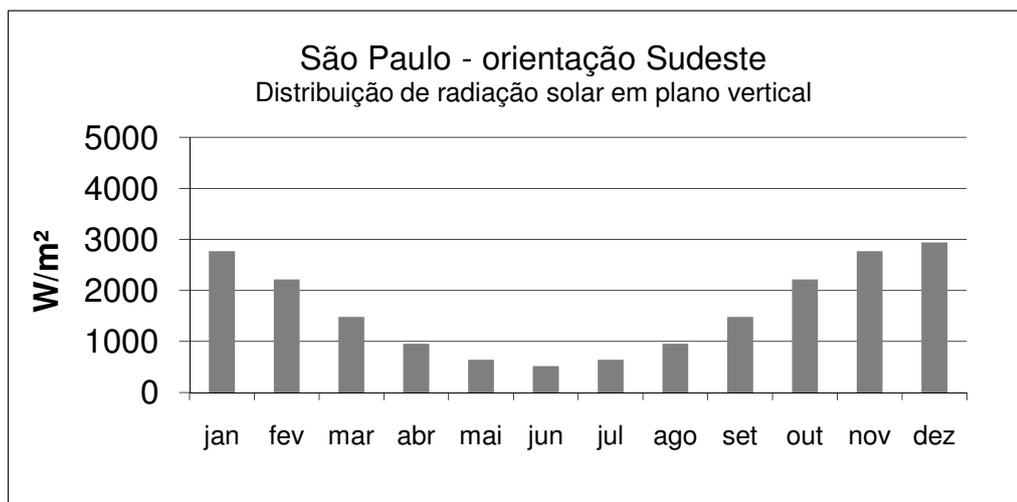


Figura 140. Distribuição de radiação solar global em plano vertical em São Paulo: orientação SE (total diário)

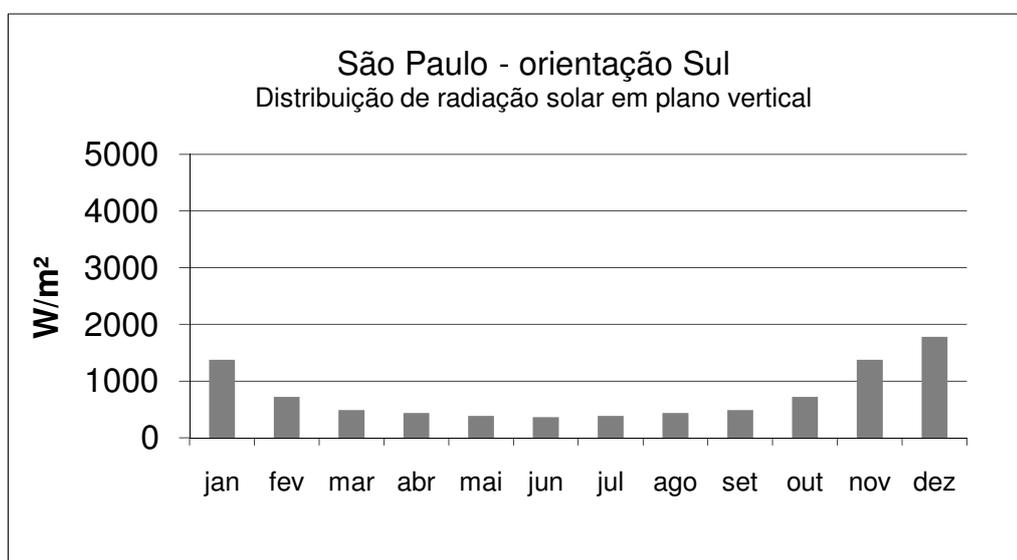


Figura 141. Distribuição de radiação solar global em plano vertical em São Paulo: orientação S (total diário)

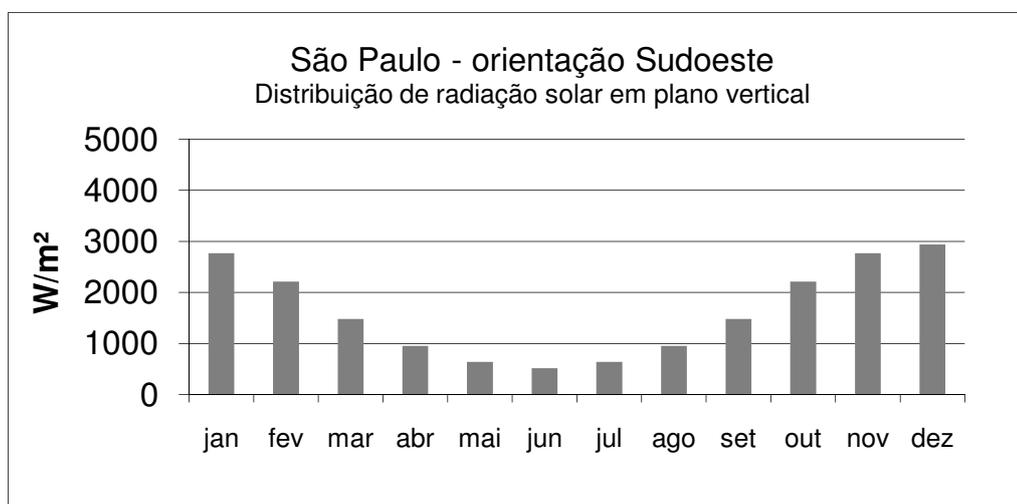


Figura 142. Distribuição de radiação solar global em plano vertical em São Paulo: orientação SO (total diário)

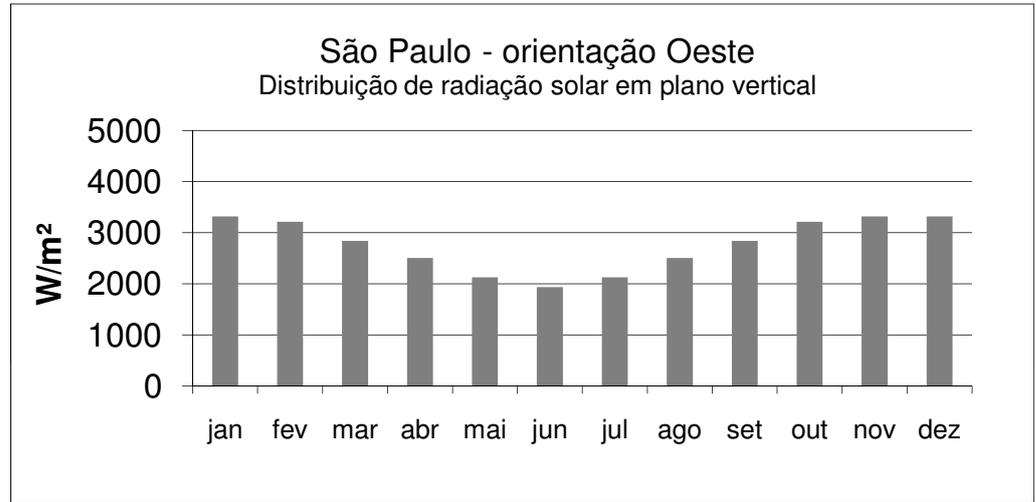


Figura 143. Distribuição de radiação solar global em plano vertical em São Paulo: orientação O (total diário)

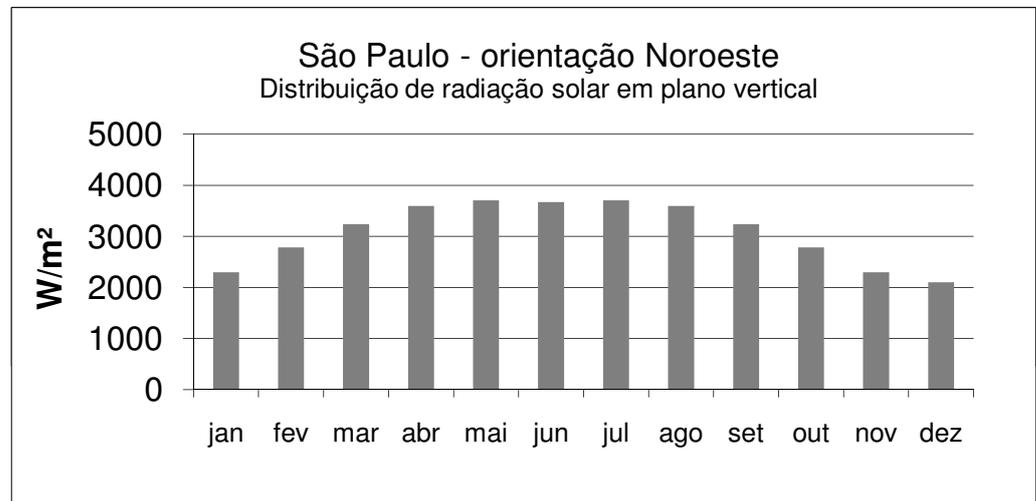


Figura 144. Distribuição de radiação solar global em plano vertical em São Paulo: orientação NO (total diário)

Tabela 11. Tabela resumo: Radiação solar global em plano vertical em São Paulo; total diário

**Radiação solar global em plano vertical (W/m²)**

	jan	fev	mar	abr	mai	jun	jul	ago	set	out	nov	dez
N	707	1527	2974	4169	4717	4823	4717	4169	2974	1527	707	587
NE	2298	2784	3237	3595	3703	3671	3703	3595	3237	2784	2298	2099
L	3318	3212	2843	2504	2126	1935	2126	2504	2843	3212	3318	3320
SE	2769	2215	1479	955	640	516	640	955	1479	2215	2769	2940
S	1375	722	488	435	385	361	385	435	488	722	1375	1778
SO	2769	2215	1479	955	640	516	640	955	1479	2215	2769	2940
O	3318	3212	2843	2504	2126	1935	2126	2504	2843	3212	3318	3320
NO	2298	2785	3238	3596	3703	3671	3703	3596	3238	2785	2298	2099

Os dados das Figuras 137 a 144 são indicativos da necessidade de proteção das superfícies transparentes das fachadas dos edifícios contra a incidência de radiação solar em todas as orientações, o ano todo, no intuito de reduzir os ganhos de calor no ambiente de escritórios.

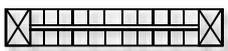
Observa-se que a orientação norte (N) apresenta os valores mais elevados, chegando a 4.823W/m<sup>2</sup> no mês de junho, como indica a Tabela 11. Para fachadas de edifícios com esta orientação o período que exige maior proteção das superfícies transparentes refere-se ao inverno, prolongando-se do mês de abril ao mês de agosto (Figura 137).

Alternativamente, os menores valores de radiação solar diária são apresentados para a orientação sul (S) com o mínimo de 36W/m<sup>2</sup> em junho, seguida das orientações sudeste (SE) e sudoeste (SO), Tabela 11. As fachadas com as orientações em questão demandam maior proteção de suas superfícies envidraçadas nos meses de outubro e novembro, e no período do verão, compreendendo os meses de dezembro a fevereiro – época em que as temperaturas do ar estão elevadas (Figuras 140, 141 e 142).

### 4.1.3. Cenários de análise

Os cenários definidos para avaliação do desempenho dos modelos de edifício de referência anteriormente elaborados - com forma da planta quadrada ou retangular, consideram duas opções de layout do espaço interno – livre ou celular, e oito orientações principais. Os cenários de análise são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12. Cenários de análise

<b>Cenários</b>			
Modelo de edifício	Planta Retangular		Planta Quadrada
Layout interno	 Livre		 Livre
	 Celular		 Celular
Orientação	N/S L/O NE/SO NO/SE		N/S/L/O NE/SO/NO/SE

A Figura 145 apresenta os cenários de edifícios inseridos na carta solar da cidade de São Paulo, ilustrando as horas de insolação em cada fachada, de acordo com as orientações consideradas.

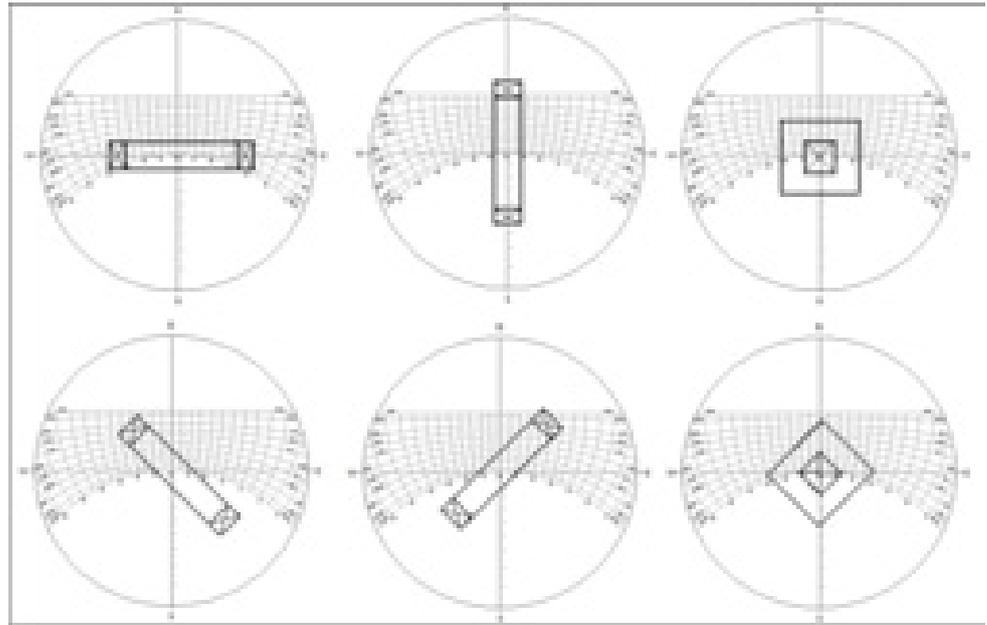


Figura 145. Cenários de análise inseridos na carta solar da cidade de São Paulo (Latitude 23°30'S), de acordo com as orientações consideradas: exemplo de edifício com planta retangular e planta quadrada, e layout livre

## 4.2. Cálculo de Ventilação Natural: definição de vazão de ar de referência

[118] Generalização adotada com base em estudos preliminares desenvolvidos para elaboração do método de avaliação proposto neste trabalho. Foram realizadas simulações computacionais de três cenários dos modelos de edifício em questão com o software TAS, com abertura das janelas para ventilação do ambiente conforme cronograma estipulado, considerando a variabilidade nas condições de incidência do vento externo de acordo com uma base de dados climáticos anual. Os resultados horários de vazão de ar e de ganhos de calor no ambiente pela fachada evidenciaram a dificuldade no estabelecimento de uma correlação entre esses parâmetros, devido ao caráter dinâmico das variáveis envolvidas (velocidade e direção do vento, temperatura do ar, radiação solar, etc). Alternativamente, se a quantidade de variáveis em situação dinâmica é limitada, sua correlação com as demais é facilitada.

A ventilação natural no interior da edificação depende da conjunção de variáveis como velocidade e direção do vento; tipo, número, dimensão e posicionamento de aberturas; orientação e implantação do edifício (considerando a possível interferência do entorno construído na obstrução ou direcionamento dos ventos), entre outros.

Estudos de ventilação natural foram desenvolvidos para calcular a vazão de ar possível para um pavimento tipo intermediário dos modelos de edifício de referência anteriormente elaborados.

Considerando o caráter dinâmico da condição de vento externo, com sua intensidade e direção variando a cada momento, e no intuito de permitir o estabelecimento de uma relação entre a vazão de ar no ambiente e os ganhos de calor pela fachada, adotou-se uma generalização para o cálculo das vazões de ar possíveis no edifício de escritórios<sup>118</sup>. Deste modo, definiu-se uma situação de referência, um momento/uma hora que acontece com alta frequência no ano, para cada cenário de análise estipulado, e calculou-se a vazão de ar possível. O valor calculado para essa condição foi, posteriormente, utilizado como dado de entrada fixo para as simulações de avaliação de desempenho térmico das 8.760 horas do ano de cada cenário de edifício.

### 4.2.1. Definição de situação de referência para cálculo da vazão de ar

Para definição da situação de referência buscou-se uma hora que acontece com alta frequência dentre as 8.760 horas do ano do banco de dados climáticos da cidade de São Paulo adotado.

Primeiramente, procurou-se identificar as condições de vento padronizadas,

estabelecendo uma correlação entre dados de direção e velocidade de vento. Determinou-se a frequência de ocorrência dos dados de direção de vento e correspondentes velocidades de ar. Conforme apresentado na Tabela 13 e nas Figuras 26 e 133, a maior frequência de ocorrência dos dados de vento acontece na direção sul, por 29% das horas do ano, com velocidade média de 4,1 m/s.

Tabela 13. Frequência de ocorrência de direção e velocidade de vento ao longo do ano de referência para São Paulo (apud Benedetto, 2007)

#### Dados de vento - banco climático São Paulo

	direção		velocidade (m/s)	frequência ocorrência (%)
	(°) de	(°) até		
N	337,5	22,5	2,3	17%
NE	22,5	67,5	2,2	12%
L	67,5	112,5	2,8	11%
SE	112,5	157,5	3,3	23%
<b>S</b>	<b>157,5</b>	<b>202,5</b>	<b>4,1</b>	<b>29%</b>
SO	202,5	247,5	3,7	2%
O	247,5	292,5	3,6	1%
NO	292,5	337,5	3,5	5%

Considerando apenas as horas ocupadas, ou seja, os dias úteis das 8h às 20h, a frequência de ocorrência dos ventos na direção sul passa a representar **34%** do total de horas.

Os dados do banco referentes às horas ocupadas com vento na direção sul foram isolados. Em seguida, realizou-se a média dos valores das outras variáveis: TBS, radiação solar, UR, nebulosidade e velocidade do ar. A velocidade média do vento encontrada foi 4,5 m/s.

Cabe ressaltar que a velocidade do ar foi considerada a variável de maior importância para o estudo realizado nesta etapa.

Dentre o conjunto de dados isolados identificou-se a hora que representava essa média, apresentando o valor de velocidade do ar correspondente (4,5 m/s) e a melhor correlação para as demais variáveis.

De acordo com o procedimento descrito, a **hora de referência** para os cálculos de ventilação natural corresponde às 17h do dia 9/11 da base de dados, conforme apresenta a Tabela 14.

Tabela 14. Hora de referência para cálculo de ventilação natural e média dos dados do período de ocupação para horas do banco de dados com vento no quadrante Sul

<b>Hora de Referência</b>	radiação global (W/m <sup>2</sup> )	radiação difusa (W/m <sup>2</sup> )	Nebulosidade	TBS (°C)	UR (%)	velocidade vento (m/s)	direção vento (°)
médias dados horas ocup. com vento direção Sul	76,8	52,3	0,9	21,3	72,3	4,5	175
<b>dados hora referência</b>	<b>62,1</b>	<b>39,0</b>	<b>0,6</b>	<b>22,0</b>	<b>69</b>	<b>4,5</b>	<b>190</b>

Vale ressaltar que esta etapa do trabalho não corresponde à definição de um dia “típico” ou “crítico”. Para elaboração do presente método de avaliação foram consideradas referências de métodos de cálculos para definição de dias típicos e/ou críticos, citando-se Akutsu & Vittorino (1998), e ASHRAE Handbook Fundamentals (2005).

No entanto, o presente trabalho propõe um novo método em função dos objetivos específicos desta pesquisa. A hora de referência extraída das 8.760 horas do um banco de dados climáticos é empregada no cálculo da vazão de ar possível, que, por sua vez, será utilizada como dado de entrada de simulação anual de desempenho termodinâmico do edifício. Deste modo, julgou-se inadequado, no presente estudo, partir de um dado “crítico” de uma condição de verão ou inverno, por exemplo, para uma avaliação do ano todo.

#### 4.2.2. Cálculo da vazão de ar de referência

O cálculo da vazão de ar é realizado para a hora de referência definida no item anterior, considerando duas situações:

- A: vazão de ar por “efeito chaminé”
- B: vazão de ar por “efeito de vento”

A escolha das duas situações A e B é feita na tentativa de cobrir o leque de possibilidades, abrangendo os dois extremos, por dois motivos principais. Primeiro, porque não se sabe as condições do entorno real da futura edificação a ser analisada; e segundo, e pelo fato da condição de vento ser extremamente variável.

O caso A considera uma situação com velocidade do vento externo igual a zero, na qual a ventilação do interior do edifício se daria através da diferença de pressão decorrente das diferenças de temperatura do ar interior e exterior (Frota & Schiffer, 1995). Pode-se dizer que essa situação representa a existência de obstrução à ventilação natural do edifício, como por exemplo, a presença de outros edifícios ao seu redor.

Já a situação B considera o edifício totalmente desobstruído, e a ocorrência de vento no exterior. Segundo Alucci (2007), a predição da vazão de ar por efeito de vento só pode ser realizada de modo genérico, tendo em vista o caráter dinâmico do vento. “Cálculos precisos sobre a ação dos ventos nas edificações exigem ensaios em túnel de vento e/ou o uso de ferramentas computacionais (*Computer Fluids Dynamics* - CFD) que consideram todos os fenômenos físicos (termodinâmicos) envolvidos na interação entre o campo das forças de vento, obstáculos e características de rugosidade do terreno” (Alucci, 2007, p.99).

Em ambas as situações o edifício de escritórios foi idealizado sem a influência do clima urbano em termos de poluição do ar e sonora.

Para o cálculo da vazão de ar no ambiente de escritórios por efeito chaminé (situação A), foi utilizado o método proposto em Frota & Schiffer (1995). De acordo com este método, a vazão de ar no ambiente por efeito chaminé pode ser calculada por:

$$\Phi_{ch} = 0,14 \times A_{ch} \times \sqrt{(H_1 \times \Delta T_1)} \quad \text{m}^3/\text{s} \quad \text{eq 4-2}$$

Onde:

$A_{ch}$  corresponde à área da menor abertura, seja a de entrada ou a de saída do ar ( $\text{m}^2$ )

$H_1$  é a distância entre o centro das aberturas de entrada e saída do ar (m)

$$\Delta T_i = (1-m) \Delta T \quad \text{eq 4-3}$$

$m$  é o coeficiente de amortecimento, vinculado à inércia do ambiente

$\Delta T$  é a diferença entre a temperatura do ar interna e externa

O coeficiente “ $m$ ” é calculado de acordo com a resistência térmica dos revestimentos e a superfície equivalente pesada do ambiente. Para os escritórios dos dois modelos de edifício considerados, com *layouts* livre ou celular,  $m=0,6$  (construção com inércia fraca) (Frota & Schiffer, 1995).

Para esta etapa do trabalho adotou-se  $\Delta T=3^\circ\text{C}$ , valor indicado pelo CIBSE Applications Manual AM10 (2005) no procedimento de cálculo para o dimensionamento de aberturas para ventilação em edifícios de escritórios. O valor em questão é obtido a partir da realização de estudos com simulações computacionais, visando detectar o efeito máximo da ventilação natural na temperatura do ar no ambiente (*cooling potential*), isto é, a redução da temperatura do ar, em graus Celsius, conforme o aumento das taxas de ventilação (CIBSE AM10, 2005, p.39).

Para situações em que as aberturas de entrada e de saída do ar têm áreas diferentes, a vazão calculada pela equação 4-2 deve ser corrigida segundo o gráfico da Figura 146.

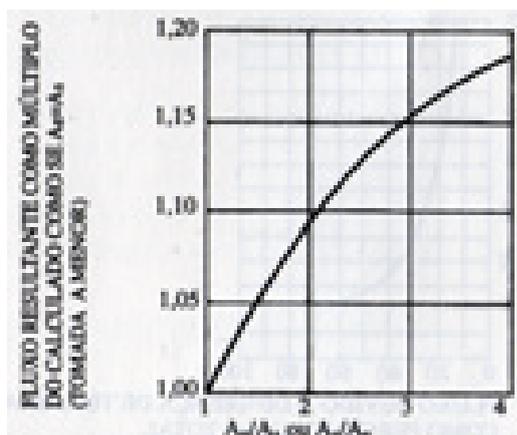
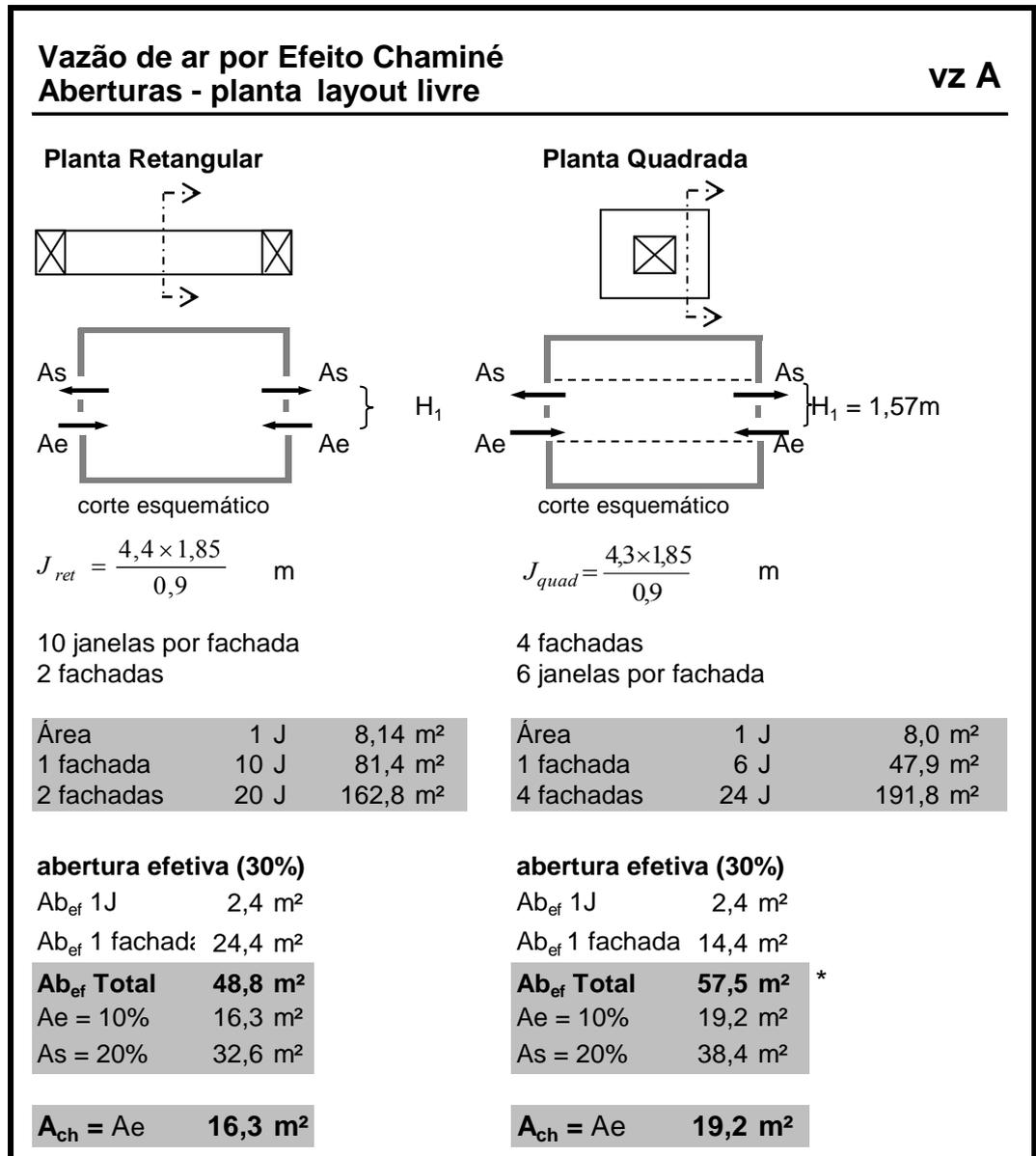


Figura 146. Gráfico para determinação do incremento de vazão causado pelo excesso de área de uma abertura sobre a outra (Frota, 1995).

As áreas de aberturas consideradas nos cálculos de vazão de ar por efeito chaminé são apresentadas nas Figuras 147 e 148, com distinção entre os edifícios de planta retangular e layout livre, planta quadrada e layout livre e edifícios com layout celular, retangulares ou quadrados. Todos os escritórios possuem janelas do tipo maxim-ar (com 30% de abertura efetiva para ventilação), mas cada uma dessas três configurações de edifícios comporta uma quantidade diferente de janelas em suas fachadas, o que resultou em distintos valores de abertura efetiva para vazão de ar por efeito chaminé ( $A_{ch}$ ). Para todos os casos, a área da menor abertura correspondeu à de entrada do ar ( $A_e$ ), e, portanto, esta foi utilizada como  $A_{ch}$ .

Os resultados de vazão de ar por efeito chaminé para os cenários de análise, calculados com método proposto por Frota & Schiffer (1995), são apresentados na Tabela 15. Estes são equivalentes para todos os cenários de cada configuração de edifício, a dizer, edifícios com planta retangular livre, edifícios com planta quadrada livre e edifícios com layout celular (retangulares e quadrados). O resultado detalhado do cálculo encontra-se no Apêndice A da tese.



\*considera as 4 fachadas com janelas

Figura 147. Quadro de áreas das aberturas para cálculo de ventilação natural: vazão de ar por efeito chaminé; planta retangular e quadrada, com layout livre

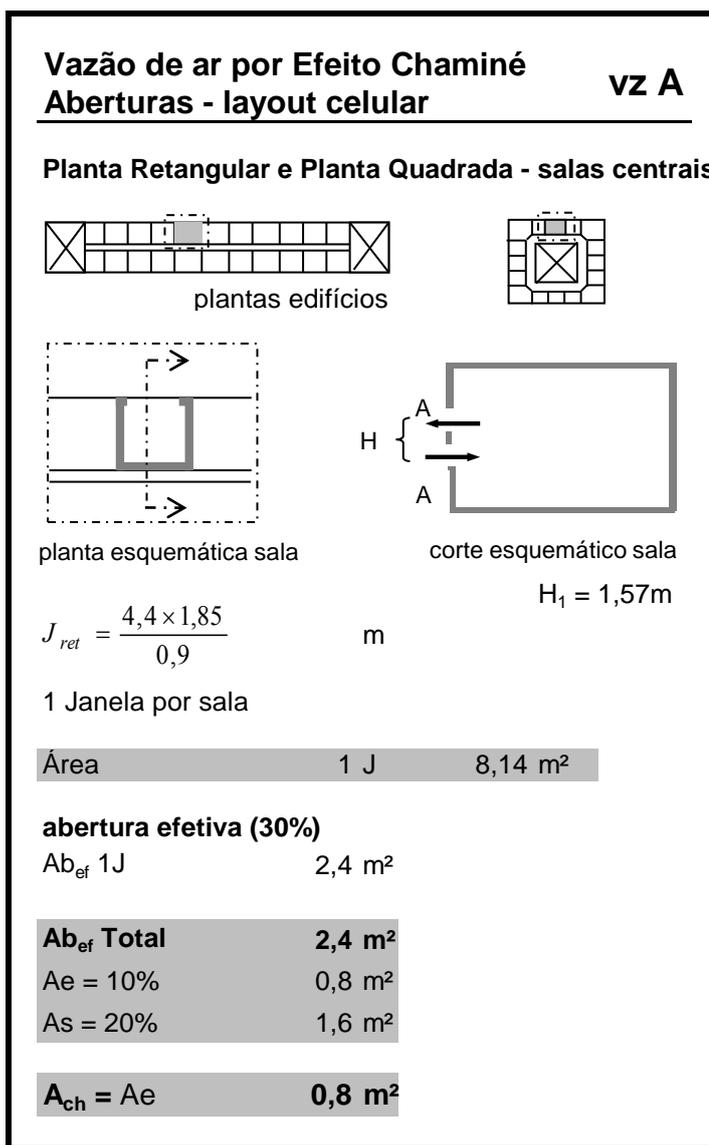


Figura 148. Quadro de áreas das aberturas para cálculo de ventilação natural: vazão de ar por efeito chaminé; planta retangular e quadrada, com layout celular

Tabela15. Cálculo de vazão de ar por efeito chaminé (vz A) pelo método BS5925(1991): resultados para planta livre e para as salas centrais de planta com layout celular

**Vazão de ar por Efeito Chaminé (vz A)**

cenário / orientação	$\phi$ (m <sup>3</sup> /s)	$\phi$ (vol/h)
Ret Livre	<b>3,41</b>	<b>6,1</b>
Quad Livre	<b>4,02</b>	<b>7,1</b>
Ret/Quad Celular	<b>0,17</b>	<b>7,0</b>

[119] Os resultados de vazão de ar em  $m^3/s$  são multiplicados pelo volume de cada ambiente ( $m^3$ ) e divididos pela quantidade de segundos contida em uma hora (3.600) para obtenção da vazão de ar em volumes por hora (vol/h).

[120] Método considera a vazão de ar por efeito de vento somada a vazão de ar por efeito chaminé.

Nota-se a semelhança entre os resultados obtidos em termos de volumes por hora<sup>119</sup>, com variação máxima de 1 vol/h entre as configurações de edifício: 6,1 vol/h para os cenários de edifício retangular livre, 7 vol/h para os edifícios quadrados livres e 7,1 vol/h de vazão de ar nas salas dos edifícios com layout celular. Observa-se na equação 4-2 que o único parâmetro que variou no cálculo da vazão de ar por efeito chaminé para as três configurações de edifício consideradas foi Ach, em virtude da quantidade de janelas em cada caso, já que  $H_1$  e  $\Delta T_1$  são equivalentes com a utilização geral de janelas do tipo maxim-ar.

Alternativamente, o cálculo da vazão de ar por efeito chaminé segundo método proposto pelo British Standard 5925 (1991) pressupõe equações distintas para configurações de edifício com aberturas para ventilação em uma única superfície do ambiente de análise (*single-sided ventilation*) – caso dos cenários com layout celular, e edifícios que permitem ventilação cruzada (*cross ventilation*), isto é, que possuem aberturas em duas ou mais superfícies do ambiente de estudo – caso dos cenários com planta livre.

O Apêndice B traz os cálculos de vazão de ar por efeito chaminé segundo a norma BS5925 (1991), para os cenários de análise.

A Tabela 16 apresenta os resultados dos cálculos de vazão de ar por efeito chaminé segundo a norma BS5925 (1991), comparativamente aos resultados obtidos de acordo com o método proposto por Frota & Schifer (1995), para os cenários de análise da pesquisa.

Tabela 16. Resultados do cálculo de vazão de ar por efeito chaminé (vz A) para os cenários de análise com método proposto por Frota & Schifer (1995) em comparação aos resultados obtidos com método da norma BS 5925 (1991)

**Vazão de ar por efeito chaminé (vz A)**

cenário / orientação	método Frota & Schiffer (1995)		método BS 5925 (1991)	
	$\phi$ ( $m^3/s$ )	$\phi$ (vol/h)	$\phi$ ( $m^3/s$ )	$\phi$ (vol/h)
Ret Livre	3,41	6,1	17,33	30,8
Quad Livre	4,02	7,1	20,41	36,3
Ret/Quad Celular	0,17	7,0	1,21	49,8

É possível observar a distinção entre os valores obtidos com a utilização desses dois métodos de cálculo, sendo os resultados calculados pela norma inglesa de cinco a sete vezes maiores do que os resultados calculados pelo método de Frota. De acordo com o método da norma inglesa, a vazão de ar interna chega a 49,8 vol/h nas salas de escritórios dos edifícios com layout celular.

Pelo explicitado, julgou-se mais adequado para as condições de edifício e clima analisadas neste trabalho basear o cálculo de vazão de ar dos escritórios por efeito chaminé conforme método proposto por Frota & Schifer (1995).

Já para o cálculo da vazão de ar no ambiente de escritórios por efeito de vento (situação B), utilizou-se o método proposto pelo British Standard 5925 (1991)<sup>120</sup>. O método da norma inglesa faz uma diferenciação entre configurações de edifício com aberturas para ventilação em uma única superfície do ambiente de análise (*single-sided ventilation*) – caso dos cenários com layout celular, e edifícios que permitem ventilação cruzada (*cross ventilation*), isto é, que possuem aberturas em duas ou mais superfícies do ambiente de estudo – caso dos cenários com planta livre.

Para o escritório de planta livre com aberturas em superfícies opostas, de acordo com o método da norma inglesa BS 5925 (1991), a vazão de ar por efeito de vento pode

ser calculada por:

$$\Phi_v = C_d \times A_o \times V \sqrt{\Delta C_p} \quad \text{m}^3/\text{s} \quad \text{eq 4-4}$$

Onde:

**C<sub>d</sub>** é o coeficiente de perda de carga da abertura; valor entre 1 e 0 que fornece a parcela útil da energia para a ventilação. O valor comumente utilizado para C<sub>d</sub> é 0,6. (Frota & Schiffer, 1995; Cóstola, 2006; Alucci, 2007)

**A<sub>o</sub>** é a área equivalente de aberturas para ventilação, calculada por:

$$\frac{1}{(A_o)^2} = \frac{1}{(A_e)^2} + \frac{1}{(A_s)^2} \quad \text{m}^2 \quad \text{eq 4-5}$$

**A<sub>e</sub>** é a área de entrada do vento

**A<sub>s</sub>** é a área de saída do vento

**V** velocidade do ar externo, corrigida em função da direção de incidência (Frota & Schiffer, 1995), calculada por:

$$V = V_o * \cos \Theta \quad \text{m/s} \quad \text{eq 4-6}$$

**Θ** é o ângulo de incidência do vento com relação à abertura

**V<sub>o</sub>** é a velocidade do ar externo corrigida para as características do tecido urbano e da altura do ponto de análise, calculada (BS 5925, 1991) por:

$$V_o = v_{\text{ext}} * K * Z^a \quad \text{m/s} \quad \text{eq 4-7}$$

**v<sub>ext</sub>** é a velocidade do vento registrada na estação meteorológica, a 10m de altura

**K, a** são parâmetros em função do perfil do terreno, indicados na Tabela 17

Para o contexto urbano:

$$K = 0,35$$

$$a = 0,25$$

**Z** é altura do ponto onde se deseja determinar a velocidade do vento (m)

**ΔC<sub>p</sub>** é a diferença entre os coeficientes de pressão (C<sub>p</sub>) de entrada (C<sub>e</sub>) e saída de ar (C<sub>s</sub>) na abertura

As velocidades do vento externo corrigidas para as diferentes orientações dos ambientes considerados, os escritórios do 5º pavimento de cada edifício (cota +23m), estão apresentados na Tabela 18. Nota-se que os maiores valores acontecem para as

[121] Nesta etapa de cálculo estão contempladas as salas com aberturas unilaterais, ou seja, a totalidade das salas do edifício de planta retangular, e as salas centrais do edifício de planta quadrada. Para as salas de esquina do edifício de planta quadrada deve ser utilizada uma metodologia de cálculo diferente, pois essas possuem aberturas em superfícies adjacentes, possibilitando a ocorrência de ventilação cruzada no ambiente.

salas orientadas a Norte e a Sul, 4,4m/s. Por outro lado, valores de 0,6m/s foram obtidos externamente às salas e aos edifícios de planta livre com orientação Leste e Oeste, os menores calculados. Tal fato decorre destas superfícies estarem perpendiculares à direção do dado de vento do momento de referência: Sul.

O valor do coeficiente de pressão em um dado ponto na fachada do edifício varia em função da direção do vento em relação a este ponto. Para o cálculo da vazão de ar de referência considerou-se a variação dos coeficientes de pressão nas superfícies verticais conforme a direção do vento incidente, como representado por Sharag (2006), e ilustrado na Figura 149. Deste modo, os coeficientes de pressão ( $C_p$ ) para entrada ( $C_e$ ) e saída do ar ( $C_s$ ) calculados para o modelo de edifício de referência são apresentados na Figura 150.

Considerando a vazão de ar por efeito de vento ( $v_z B$ ) para a sala do escritório de planta celular com abertura unilateral<sup>121</sup>, de acordo com o método da norma inglesa BS 5925 (1991), esta pode ser calculada por:

$$\Phi_v = 0,025 \times A_o \times V \quad \text{m}^3/\text{s} \quad \text{eq 4-8}$$

As áreas de aberturas consideradas nos cálculos de vazão de ar por efeito de vento para a planta retangular e para a planta quadrada com layout livre, e para a sala de escritório dos edifícios com layout celular, são ilustradas nas Figuras 151 e 152, respectivamente.

Os resultados dos cálculos de vazão de ar por efeito de vento para a sala de escritório dos edifícios com planta retangular e planta quadrada de layout livre e celular são apresentados na Tabela 19.

É possível notar na Tabela 19 que as vazões de ar calculadas para os escritórios orientados (exclusivamente) a Leste e a Oeste são as menores do conjunto (representando até 10% dos resultados calculados para as demais orientações, tanto entre os cenários com layout livre, quanto para aqueles com layout celular). Este fato decorre das baixas velocidades de vento externo nessas orientações, como anteriormente observado. Nota-se, também, que maiores vazões de ar são obtidas para os escritórios de planta livre, comparativamente àqueles com layout celular, para todos os cenários. Tal situação evidencia o efeito da ventilação cruzada no incremento da vazão de ar interna, para a condição “com vento” (vazão B).

Tabela 17. Valores de correção para cálculo da velocidade do vento, propostos pela BS 5925 (1991)

Terreno	k	a
Campo aberto plano	0,68	0,17
Campo com barreiras	0,52	0,20
Cidade (perfil horizontal)	0,35	0,25
Centro urbano	0,21	0,33

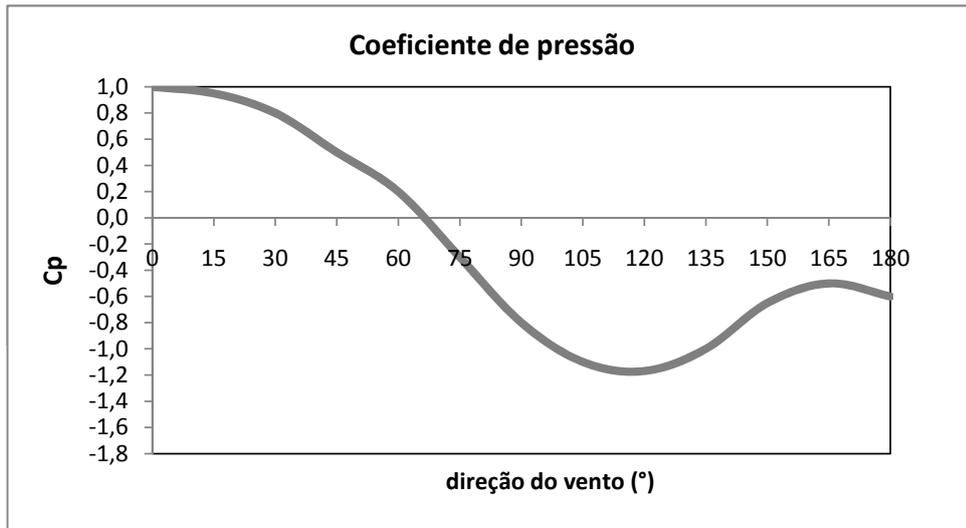


Figura 149. Distribuição dos coeficientes de pressão ( $C_p$ ) em superfícies verticais em função da direção de incidência do vento (Sharag, 2006)

**Coeficientes de pressão ( $C_p$ ) calculados para o modelo de edifício de referência**

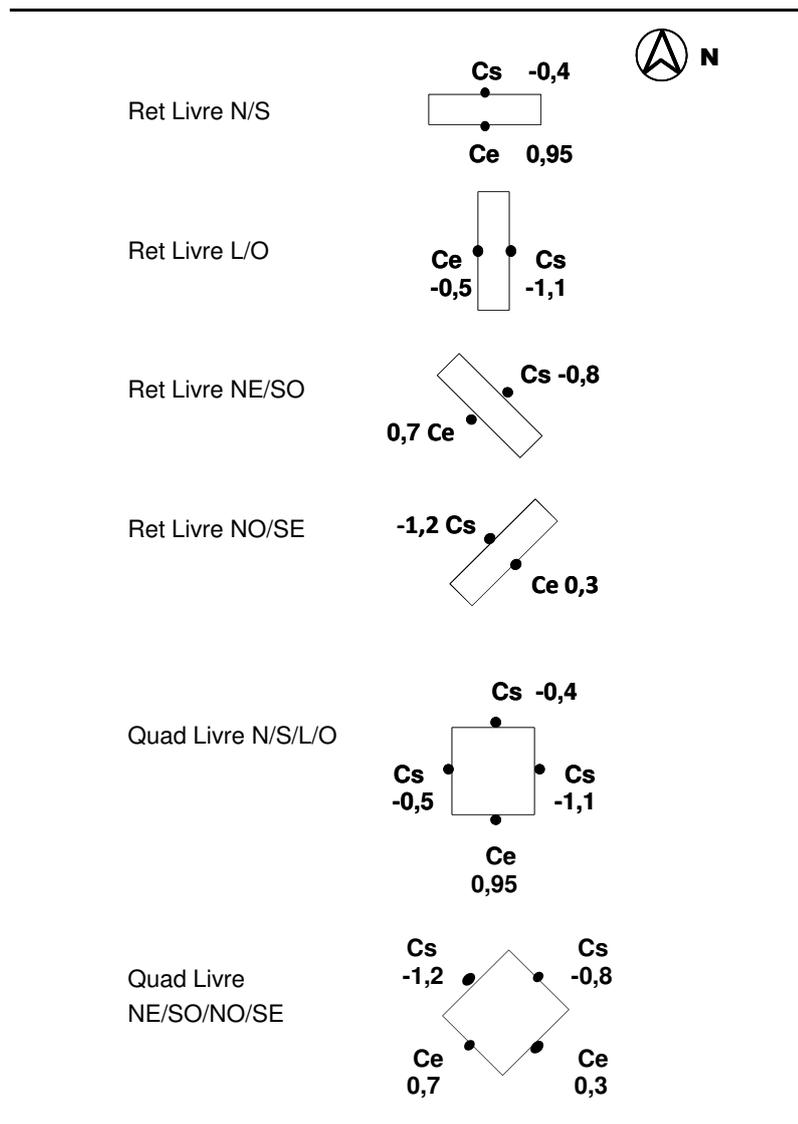
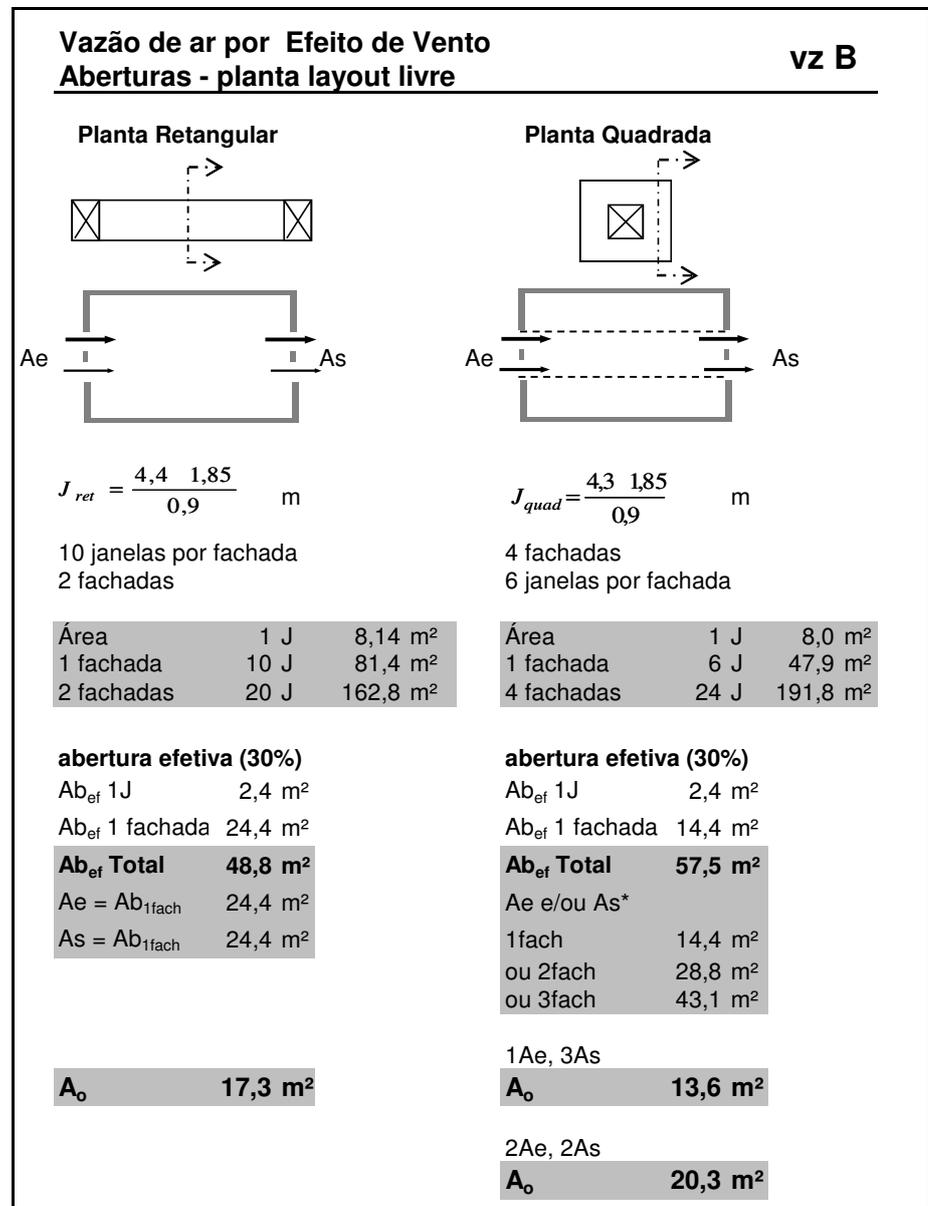


Figura 150. Coeficientes de pressão para entrada ( $C_e$ ) e saída do ar ( $C_s$ ) calculados os modelos de edifício de referência, segundo método proposto por Sharag (2006)



\*depende dos CPs de cada caso

Figura 151. Quadro de áreas das aberturas para cálculo de ventilação natural: vazão por efeito de vento; planta com layout livre

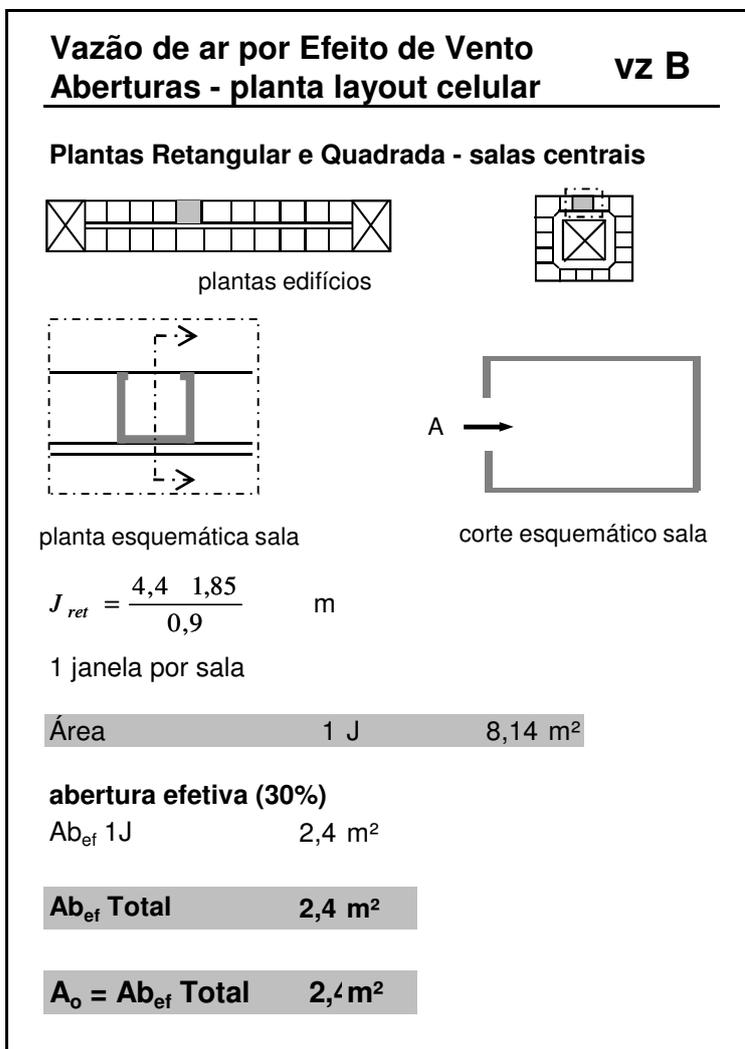


Figura 152. Quadro de áreas das aberturas para cálculo de ventilação natural: vazão por efeito de vento; planta com layout celular

Tabela 18. Ambientes analisados e dados de velocidade do vento corrigidos; planta layout livre e celular

<b>Vazão de ar por Efeito de Vento (vz B)</b>	
cenário / orientação	V (m/s)
Ret Livre N/S	3,5
Ret Livre L/O	0,6
Ret Livre NE/SO	2,9
Ret Livre NO/SE	2,0
Quad Livre N/S/L/O	3,5
Quad Livre NE/SO/NO/SE	2,0
Ret e Quadr Celular N	4,4
Ret e Quadr Celular S	
Ret e Quadr Celular L	0,6
Ret e Quadr Celular O	
Ret e Quadr Celular NE	2,9
Ret e Quadr Celular SO	
Ret e Quadr Celular NO	2,0
Ret e Quadr Celular SE	

Tabela 19. Cálculo de vazão de ar por efeito de vento (vz B), método BS5925(1991): resultados

<b>Vazão de ar por Efeito de Vento (vz B)</b>		
cenário / orientação	$\phi$ (m <sup>3</sup> /s)	$\phi$ (vol/h)
Ret Livre N/S	41,79	74,3
Ret Livre L/O	4,91	8,7
Ret Livre NE/SO	36,64	65,1
Ret Livre NO/SE	25,66	45,6
Quad Livre N/S/L/O	48,81	86,8
Quad Livre NE/SO/NO/SE	42,74	76,0
*Celular N	0,27	11,1
*Celular S	0,27	11,1
*Celular L	0,04	1,5
*Celular O	0,04	1,5
*Celular NE	0,18	7,2
*Celular SO	0,18	7,2
*Celular NO	0,12	5,1
*Celular SE	0,12	5,1

\*Ret/Quadr salas centrais

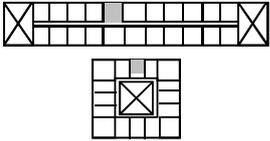
[122] O software TAS foi apresentado no item 2.3 deste trabalho.

Para todos os cenários estudados, as vazões de ar possíveis estão de acordo com os valores mínimos previstos para efeito de salubridade pela norma NBR16401 (2008), considerando atividade de escritórios, e uma ocupação do ambiente de uma pessoa por 10m<sup>2</sup> de espaço de trabalho, Tabela 20. Observa-se que apenas a vazão de ar calculada para os cenários de edifícios com layout celular orientados a Leste e a Oeste, na condição com vento (1,5 vol/h; Vazão B), aproximam-se do valor mínimo estipulado por essa norma técnica (0,92 vol/h), ainda assim, ultrapassando em 50% o valor necessário. Para os demais cenários de estudo, os resultados obtidos são da ordem de cinco a oitenta vezes maiores do que as vazões mínimas exigidas pela norma brasileira.

Vale ressaltar que a NBR 16401 refere-se a ambientes artificialmente climatizados, mas foi usada como referência para esse estudo devido à inexistência de normas nacionais que estipulem valores de vazão de ar para ambientes naturalmente ventilados.

Tabela 20. Dados mínimos de vazão de ar no ambiente exigidos pela NBr 16401 para a atividade de escritório, por cenário de análise

#### Taxas mínimas de renovação do ar

ocupação máxima: 1 pessoa / 10m <sup>2</sup>	ocupação máx (n. pessoas)	vazão mín NBr 16401 27m <sup>3</sup> /h/pessoa		
		(m <sup>3</sup> /s)	(vol/h)	
Planta Retangular Layout Livre		67	0,50	0,89
Planta Quadrada Layout Livre		67	0,50	0,89
Planta Retangular e Planta Quadrada Layout celular - salas centrais		3 *	0,02	0,92

## 4.3. Simulações de Desempenho Térmico

Simulações computacionais anuais de desempenho térmico foram realizadas para os modelos de edifício de escritórios de referência com o programa TAS<sup>122</sup>, para análise dos cenários estipulados. Os cenários diferem quanto à forma do edifício, o layout interno e a orientação dos ambientes (Tabela 12). As simulações consideram valores fixos de cargas térmicas de ocupação e de vazão de ar no ambiente, no intuito de facilitar a identificação dos ganhos de calor no ambiente pela fachada.

### 4.3.1. Modelos Geométricos

Modelos geométricos de edifícios foram construídos no software TAS conforme as dimensões e especificações de materiais e sistemas construtivos dos dois modelos de referência elaborados no capítulo 3, para duas configurações de layout interno: livre e celular (divisão em salas). Em ambos os modelos as fachadas expostas dos escritórios apresentam 50% de wwr, sendo as superfícies transparentes compostas por vidro

[123] Como consequência dos ganhos de calor pela fachada ocorrem variações nas temperaturas internas (do ar e superficiais) e na umidade relativa do ar do ambiente.

laminado incolor 8mm sem sombreamento (vide item 3.2). Esses foram simulados para as oito orientações principais, a dizer: N, S, L, O, NE, SE, NO, SO; e aparecem ilustrados na Figura 153.

Nos modelos de edifício com layout celular, cada sala de escritório corresponde a uma zona térmica ou zona de análise. Já para os modelos com layout livre, o ambiente de escritórios de cada pavimento foi dividido com uma "linha imaginária" em zonas de influência de cada fachada, sendo duas zonas na planta retangular e quatro na planta quadrada, como é possível observar na Figura 155. Esclarece-se que o ambiente de escritórios permanece totalmente integrado, sendo essa "linha imaginária" apenas uma estratégia de simulação para possibilitar a extração de resultados independentes para cada zona. Tal estratégia foi necessária para a identificação dos resultados de ganho de calor solar nos escritórios com layout livre para cada uma das fachadas, separadamente.

Os resultados das simulações foram analisados para o escritório do 5º pavimento tipo, que está na cota +23m (Figura 154).

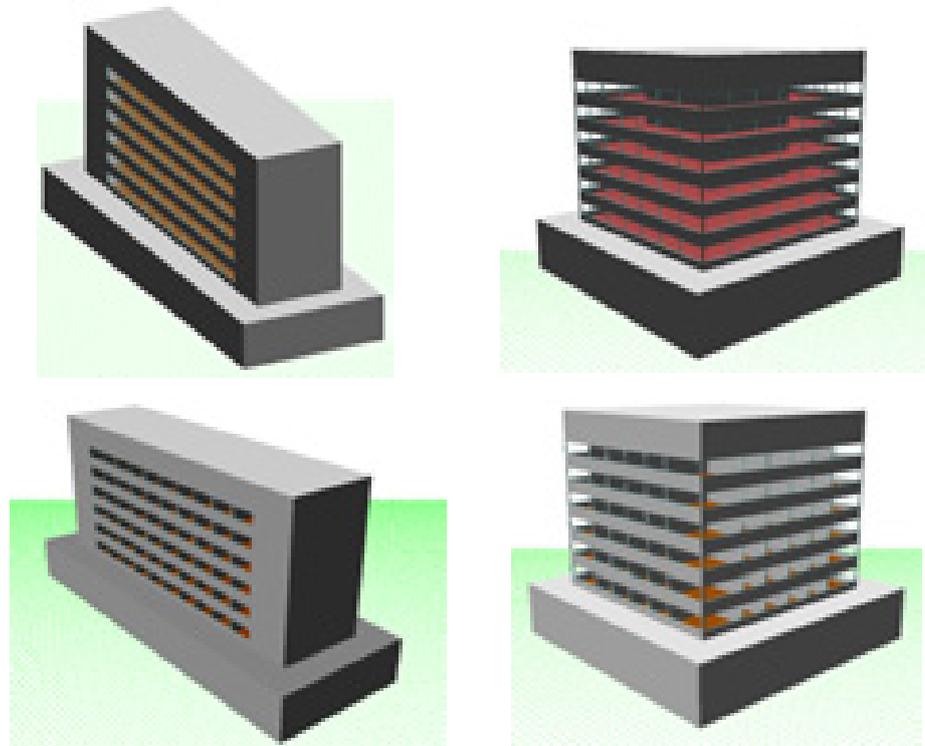


Figura 153. Modelos geométricos no programa TAS: edifício retangular (à esquerda) e edifício quadrado (à direita), layout livre (acima) e layout celular (abaixo)



Figura 154. Seção dos modelos de edifícios, retangular e quadrado, respectivamente, com destaque para o escritório de análise: quinto pavimento tipo

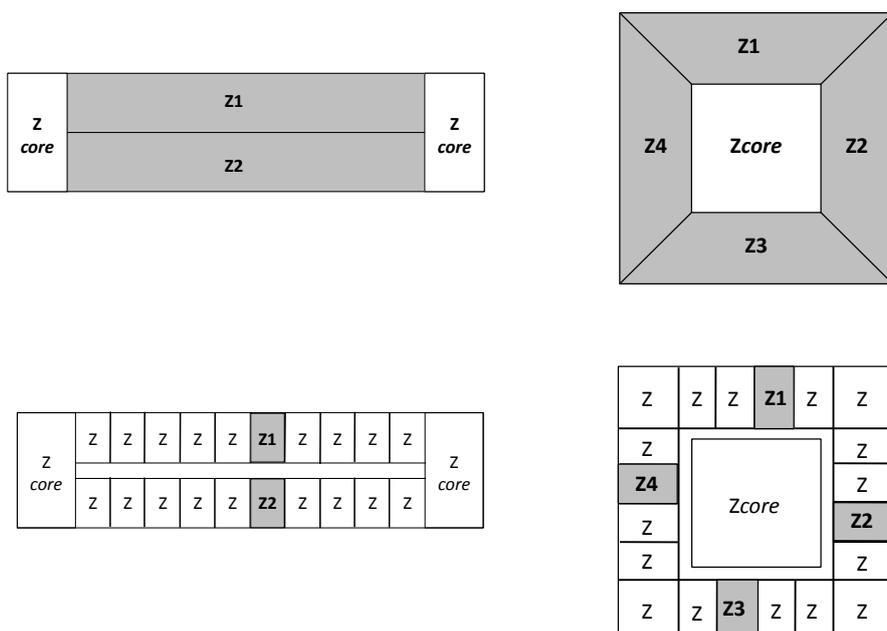


Figura 155. Modelos geométricos no programa TAS: zonas de análise no 5º pavimento tipo, em destaque; plantas com layout livre, à esquerda, e plantas com layout celular, à direita

### 4.3.2. Parâmetros e cenários de simulação

Os edifícios de referência foram simulados com características fixas, tendo como único parâmetro variável os ganhos de calor pela fachada<sup>123</sup>.

O período de ocupação considerado foi de 8h às 20h, em dias úteis. Durante esse período, adotou-se uma pessoa a cada 10m<sup>2</sup> (com 140W de carga térmica emitida), 8W/m<sup>2</sup> de iluminação artificial e 10W/m<sup>2</sup> proveniente do uso de equipamentos nos escritórios. Sendo assim, carga térmica máxima considerada no ambiente foi de 32 W/m<sup>2</sup> (como explicado no capítulo 3).

Durante o período de ocupação, aplicou-se o valor de vazão de ar fixo calculado no item 4.2 para cada cenário de análise, simulando a ventilação natural do ambiente proporcionada por janelas do tipo maxim-ar com sua abertura máxima, para as duas situações de ventilação, efeito chaminé ou efeito de vento, separadamente.

Para as horas não ocupadas utilizou-se a vazão de 4 vol/h (CIBSE AM13, 2000)<sup>124</sup> para ambas as situações de ventilação. Essa taxa de 4vol/h pressupõe a ocorrência de ventilação noturna, e não apenas de uma taxa mínima de renovação do ar ou infiltração necessária para questões de salubridade (Tabela 20); esse valor é fixo nas simulações para representar um cenário com janelas abertas durante o período não ocupado (das 20h às 8h), já que as mesmas não abrem efetivamente nessas simulações.

A respeito da ventilação noturna, estudos anteriores (Marcondes, 2004) apontaram o potencial benefício de sua incorporação em edifícios de escritórios em São Paulo, tirando partido das condições do ar externo durante a noite e as primeiras horas da manhã - quando, em geral, encontram-se mais favoráveis para o clima da cidade, com temperaturas amenas - para resfriar a massa exposta do ambiente.

[124] Valor sugerido pelo "CIBSE Manual AM13:2000 – Mixed mode ventilation" para taxa de ventilação noturna, para modelar efeitos de resfriamento a partir de ventilação natural (*natural cooling effects*), de modo acurado, por meio de simulações computacionais avançadas (*advanced computer-based analytical techniques*) (CIBSE AM13, 2000, p. 20).

[125] No programa TAS, os ganhos de calor em questão são correspondentes à soma dos ganhos devido à radiação solar de todas as superfícies voltadas para a zona de análise.

De acordo com os cenários anteriormente estipulados e a divisão dos modelos geométricos de edifício em zonas de análise, resultou-se em 32 cenários de simulação (ou ambientes de escritórios), por situação de ventilação/vazão de ar considerada. Desse modo, um total de 64 cenários de simulação foram analisados.

### 4.3.3. Verificação da premissa de ventilação natural para a simulação computacional

Simulações computacionais foram realizadas para verificação da premissa de ventilação natural adotada, ou seja, da vazão de ar de referência conforme o método de cálculo considerado e a estimativa dessa grandeza no programa TAS. Escolheu-se o edifício com planta retangular e layout livre orientado a N/S para essa verificação, na situação de ventilação por efeito de vento (vazão B, cenários 33 e 34). O edifício em questão foi simulado em dois casos.

Para o primeiro caso realizou-se o procedimento indicado no método de avaliação proposto:

(a) cálculo da vazão de ar para o momento de referência, como indicado no item 4.2.2:  
 $\Phi_v = 74,3 \text{ vol/h}$ ;

(b) simulação do edifício com janelas “fechadas” e atribuição do valor de vazão de ar calculado fixo no ambiente, para as horas do período de ocupação; utilização do banco de dados climáticos de Benedetto (2006).

Para o segundo caso realizou-se o seguinte procedimento:

(a) edição do banco de dados climáticos: os valores de direção e velocidade de vento calculados para o momento de referência foram atribuídos a todas as horas do banco de dados referentes ao período de ocupação; as demais variáveis climáticas externas (temperatura e umidade relativa do ar, radiação solar e nebulosidade) mantém sua variação horária;

(b) simulação do edifício com janelas operantes, seguindo cronograma e parâmetro de abertura definidos para o cálculo de vazão de ar de referência (ou seja, janelas com abertura máxima no período de ocupação, equivalente a 30% de abertura efetiva).

Comparou-se a vazão de ar de referência com a vazão de ar resultante no ambiente do segundo caso, no dia e hora equivalente ao momento de referência, isto é, às 17 horas do dia 09/11 do ano simulado: 76,6 vol/h.

Foram comparados, também, os resultados de porcentagem anual de conforto das simulações para o caso 1 e o caso 2: 95,7% no caso 1, e 92,9% no caso 2.

Com a variação da ordem de 3% nos resultados de vazão de ar obtidos nos dois casos para o momento de referência, e nos resultados de porcentagem de conforto anual, verificou-se a coerência da premissa de ventilação natural para as simulações computacionais do método de avaliação proposto.

### 4.3.4 Resultados

A partir dos resultados das simulações computacionais foram extraídas as temperaturas do ar internas (TBS e TRM) e os ganhos de calor no ambiente através das fachadas<sup>125</sup> (Q) (sem considerar os ganhos internos de ocupação) de cada cenário simulado, para o escritório do 5º pavimento.

A partir dos valores de TBS e TRM foram calculadas as temperaturas operativas do ar interno ( $T_o$ ) para as 8.760 horas do ano, conforme apresentado no item 4.11. Na sequência, os escritórios com diferentes cenários foram avaliados conforme a porcentagem das horas ocupadas do ano em conforto, de acordo com critério estabelecido.

Foram identificadas as horas ocupadas que estão dentro das condições aceitáveis de conforto, para cada cenário.

A aplicação do procedimento da norma ASHRAE 55 (2004) - ou seja, do índice de conforto adotado - à base de dados climáticos de São Paulo indica ambientes com temperaturas operativas de até 19,9°C como gerando “insatisfação por frio”<sup>[126]</sup>. Por esse motivo, assumiu-se que grande parte das horas de desconforto por frio podem ser consideradas “conforto” se realizadas medidas simples de adaptação, como por exemplo, o controle da ventilação nos períodos frios por meio do ajuste ou fechamento das janelas e o uso de vestuário adequado. Sendo assim, considerou-se a incorporação das horas de “frio” na obtenção do total de horas de conforto, dentro do período ocupado do ano.

Dentre as horas ocupadas em conforto para cada cenário de edifício, detectou-se o maior ganho de carga térmica transmitido ao ambiente pela fachada ( $Q$ ), fruto da radiação solar incidente. Dividindo-se o maior valor de  $Q$  ( $W$ ) pela área ( $m^2$ ) de cada fachada exposta obtém-se  $Q_{f\acute{m}ax}$  ( $W/m^2fach$ ), para cada cenário.

Como anteriormente observado nas Figuras 137 a 144, os valores de radiação solar incidentes no plano vertical em cada orientação na latitude de São Paulo são diferentes entre si e acontecem em épocas distintas do ano. Tal fato pode ser comparado com o ganho de calor total anual devido à radiação solar transmitido aos ambientes pelas fachadas ( $Q_{anual}$ ), por orientação de edifício.

Sendo assim, a variável  $Q_{f\acute{m}ax}$  pode corresponder a diferentes horas do dia, de dias distintos e estações do ano diversas em cada caso. Já que a composição e a especificação dos materiais nas fachadas de cada edifício são iguais,  $Q_{f\acute{m}ax}$  vai depender da quantidade de radiação solar incidente em cada fachada, da área da fachada e de sua relação com as temperaturas do ar interna e externa (as quais configuram a condição de conforto no ambiente), variando de cenário para cenário.

Os resultados das simulações computacionais são apresentados na Tabela 21, trazendo, para cada um dos 64 cenários: a porcentagem anual de horas em conforto, o ganho de calor solar total anual ( $Q_{anual}$ ) e o maior valor de ganho de calor pela fachada dentre as horas em conforto ( $Q_{f\acute{m}ax}$ ).

Para os edifícios com planta livre, apesar da divisão em zonas de simulação, na prática o ambiente interno é integrado. Desse modo, considerou-se apenas um resultado de porcentagem de conforto anual, aquele que atende a todas as zonas do pavimento – o mais restritivo (ou seja, foi considerado o menor valor das duas zonas dos edifícios de planta retangular, e o menor valor das quatro zonas dos edifícios de planta quadrada); e um resultado de ganho de calor solar total, correspondente à soma dos ganhos das 8.760 horas de todas as zonas do edifício.

Resultados detalhados da avaliação anual de desempenho térmico e energético dos edifícios de escritórios são apresentados no Apêndice C da tese, trazendo as horas em conforto e os períodos de desconforto por frio e por calor, discriminados para todas as zonas e salas compreendidas nos 64 cenários de simulação.

[126] O mês de julho é o mês mais frio da base de dados de Benedetto (2006) para São Paulo. De acordo com o procedimento da ASHRAE 55-2004, considerando um limite de  $\pm 3,5^\circ C$  aplicado a  $OT_n$ , como apresentado no item 4.1.1 para a situação de 20% de insatisfeitos, a faixa de temperatura operativa aceitável para este mês estaria entre  $20^\circ C$  e  $27^\circ C$ . Ou seja, os valores abaixo de  $20^\circ C$  caracterizam ocorrência de desconforto por “frio”, e os valores acima de  $27^\circ C$  representam desconforto por “calor”.

[127] Os resultados dos cenários 30 e 49 foram considerados adequados, tendo em vista seu arredondamento para 80%.

Tabela 21. Resultados das avaliações de desempenho térmico e energético dos cenários de edifícios simulados para vazão de ar por efeito chaminé (vz A) e por efeito de vento (vz B)

Tabela-resumo Resultados Simulações

		Cenários	Zona/sala	Vazão de ar (m <sup>3</sup> /s) (vol/h)		Conforto Anual (%)	Q <sub>7</sub> anual (MW)	Q <sub>f</sub> máx * (W/m <sup>2</sup> fach)	
Vazão A - efeito chaminé	Layout Livre	1	PI Ret Livre NS	zona N	3,41	6,1	61,2	98,8	207,3
		2		zona S					134,6
		3	PI Ret Livre LO	zona L	3,41	6,1	58,4	109,8	221,4
		4		zona O					142,6
		5	PI Ret Livre NE/SO	zona NE	3,41	6,1	57,5	106,2	225,2
		6		zona SO					132,0
		7	PI Ret Livre NO/SE	zona NO	3,41	6,1	61,1	100,5	187,4
		8		zona SE					196,2
		9		zona N					229,6
		10	PI Quad Livre NSLO	zona S	4,02	7,1	53,9	139,4	133,6
		11		zona L					237,6
		12		zona O					158,0
		13		zona NE					257,2
		14	PI Quad Livre NE/SO/NO/SE	zona SO	4,02	7,1	52,4	139,2	130,8
		15		zona NO					195,2
		16		zona SE					196,0
	17	PI Ret Celular NS	sala N	0,17	7	67,0	6,5	269,0	
	18		sala S	0,17	7	83,0	3,5	148,8	
	19	PI Ret Celular LO	sala L	0,17	7	62,9	6,5	306,6	
	20		sala O	0,17	7	74,7	4,9	185,7	
	21	PI Ret Celular NE/SO	sala NE	0,17	7	59,7	7,1	332,8	
	22		sala SO	0,17	7	80,4	3,8	161,6	
	23	PI Ret Celular NO/SE	sala NO	0,17	7	71,7	5,8	254,5	
	24		sala SE	0,17	7	72,8	4,7	258,9	
	25		sala N	0,17	7	65,2	6,2	256,6	
	26	PI Quad Celular NSLO	sala S	0,17	7	81,0	3,4	141,7	
	27		sala L	0,17	7	62,9	6,2	292,3	
	28		sala O	0,17	7	75,0	4,7	177,4	
	29		sala NE	0,17	7	58,5	6,7	317,3	
	30	PI Quad Celular NE/SO/NO/SE	sala SO	0,17	7	79,5	3,6	154,1	
	31		sala NO	0,17	7	70,8	5,5	242,7	
	32		sala SE	0,17	7	72,0	4,4	246,8	
Vazão B - efeito de vento	Layout Livre	33	PI Ret Livre NS	zona N	41,79	74,3	95,7	98,8	211,1
		34		zona S					148,0
		35	PI Ret Livre LO	zona L	4,91	8,7	66,4	109,8	224,2
		36		zona O					147,8
		37	PI Ret Livre NE/SO	zona NE	36,64	65,1	94,4	106,2	224,4
		38		zona SO					152,8
		39	PI Ret Livre NO/SE	zona NO	25,66	45,6	89,4	100,5	187,4
		40		zona SE					206,2
		41		zona N					230,4
		42	PI Quad Livre NSLO	zona S	48,81	86,8	83,6	139,4	146,4
		43		zona L					258,8
		44		zona O					173,6
		45		zona NE					257,2
		46	PI Quad Livre NE/SO/NO/SE	zona SO	42,74	76,0	82,6	139,2	155,2
		47		zona NO					209,6
		48		zona SE					226,8
	49	PI Ret Celular NS	sala N	0,27	11,1	79,0	6,5	271,5	
	50		sala S	0,27	11,1	89,8	3,5	148,8	
	51	PI Ret Celular LO	sala L	0,04	1,5	13,0	6,5	284,7	
	52		sala O	0,04	1,5	24,7	4,9	173,6	
	53	PI Ret Celular NE/SO	sala NE	0,18	7,2	60,6	7,1	333,3	
	54		sala SO	0,18	7,2	81,0	3,8	161,6	
	55	PI Ret Celular NO/SE	sala NO	0,12	5,1	63,2	5,8	254,9	
	56		sala SE	0,12	5,1	66,2	4,7	245,5	
	57		sala N	0,27	11,1	77,1	6,2	258,9	
	58	PI Quad Celular NSLO	sala S	0,27	11,1	88,4	3,4	142,0	
	59		sala L	0,04	1,5	20,4	6,2	283,1	
	60		sala O	0,04	1,5	36,3	4,7	177,1	
	61		sala NE	0,18	7,2	59,5	6,7	317,8	
	62	PI Quad Livre NE/SO/NO/SE	sala SO	0,18	7,2	80,1	3,6	154,1	
	63		sala NO	0,12	5,1	63,0	5,5	243,1	
	64		sala SE	0,12	5,1	65,9	4,4	234,1	

\* Q<sub>f</sub>máx é o maior valor horário de ganho de carga térmica no ambiente devido à radiação solar, por área de fachada, ocorrido para o conjunto de horas ocupadas em conforto de cada cenário

É possível observar na Tabela 21 que 28 dos 32 cenários simulados considerando vazão de ar por efeito chaminé (Vazão A) não atingiram o critério estipulado de no mínimo 80% das horas ocupadas em conforto. O mesmo aconteceu em 13 dos 32 cenários simulados para a situação com vento (Vazão B)<sup>127</sup>.

Com relação aos casos simulados com vazão de ar por efeito chaminé (cenários 1 a 32), nota-se que nenhum dos casos de edifício com planta livre (cenários 1 a 16) atingiu o critério de desempenho. No entanto, em todos os escritórios com planta livre condições de conforto acontecem por mais de 50% das horas ocupadas do ano, sendo o menor resultado para o edifício quadrado orientado a NE/SO/NO/SE com 52,4% (cenários 13 a 16), e o maior resultado para o edifício retangular NS, 61,2% (cenários 1 e 2). Observa-se, também, que dentre os casos com mesma orientação, as plantas retangulares apresentam resultados aproximadamente 10% maiores em comparação às plantas quadradas.

Já para as salas dos edifícios com vazão de ar por efeito chaminé e layout celular (cenários 17 a 32), os resultados mostram-se superiores aos dos edifícios de planta livre. Atendem ao critério de 80% das horas em conforto as salas S e SO, em ambos os edifícios retangular e quadrado (cenários 12, 22, 26 e 30). Comparativamente, as salas com mesma orientação mostraram resultados semelhantes entre os edifícios retangular e quadrado, com variação da ordem de 2% (positiva para o edifício retangular).

Analisando-se as simulações para os cenários com vazão de ar por efeito de vento (Vazão B), observa-se o aprimoramento nos resultados em comparação aos casos anteriores (isto é, aqueles simulados com vazão de ar por efeito chaminé). Para os escritórios de planta livre (cenários 33 a 48), apenas o edifício retangular LO não alcançou o critério de desempenho, com 66,4% das horas do ano em conforto (cenários 35 e 36). Acredita-se que tal resultado reflete o impacto da vazão de ar no edifício, sendo a vazão para o caso em questão a menor do conjunto compreendido por essa condição de ventilação: 8,7 vol/h (ou 4,9m<sup>3</sup>/s), fato ocasionado pelas baixas velocidades de vento obtidas para as orientações L e O (vide Tabela 18). Com exceção deste caso, os edifícios com planta retangular livre apresentaram resultados cerca de 10% mais elevados do que os escritórios de planta quadrada e layout livre (como verificado na situação de vazão de ar por efeito chaminé).

A respeito das salas dos escritórios com layout celular e vazão de ar por efeito de vento (cenários 49 a 64), 5 dos 16 cenários não estão em conformidade com as condições de conforto estipuladas. Dentre esses, destacam-se os resultados para as salas L e O, tanto do edifício retangular, com 13% e 24,7% das horas em conforto, respectivamente (cenários 51 e 52), quanto do edifício quadrado, apresentando 20,4% e 36,3% de conforto anual (cenários 59 e 60). Similarmente ao edifício retangular LO com layout livre, os resultados da avaliação de desempenho para essas quatro salas reflete o impacto da vazão de ar calculada para essas orientações: 1,5vol/h (o equivalente a 0,04m<sup>3</sup>/s). A vazão de ar por efeito de vento calculada para as salas L e O é a menor dentre todos os cenários analisados. Como anteriormente mencionado, o resultado desta vazão é fruto das baixas velocidades do ar obtidas para as orientações L e O. Para os demais casos de salas na condição de vazão por efeito de vento, resultados similares entre si foram verificados para salas com mesma orientação em edifícios retangulares ou quadrados.

Analisando-se o impacto da forma do edifício nos resultados, observou-se que, dentre os edifícios com layout interno livre, os cenários com planta retangular obtiveram desempenho superior (da ordem de 10%) aos cenários com mesma orientação em edifícios de planta quadrada. Já para os edifícios com layout celular, a forma geral do edifício não se mostrou como fator de significativa influência no desempenho térmico dos escritórios com mesma orientação - tendo em vista a avaliação de salas com dimensões e características construtivas idênticas entre si, para os dois tipos de edifício, e com apenas uma fachada exposta.

[128] O software TAS considera a influência da nebulosidade no céu, hora a hora, para o cálculo da radiação solar incidente nas fachadas dos edifícios em cada orientação (os dados de nebulosidade para as 8.760 horas do ano constam do banco de dados climáticos inserido nas simulações). Deste modo, a hierarquia de ganho solar total por orientação verificada nos resultados das simulações computacionais para as salas pode apresentar variações com relação à hierarquia de radiação solar incidente no plano vertical para a latitude de São Paulo indicada nas Figuras 141 e 142 do item 4.1.2 do trabalho, as quais foram calculadas a partir de dados mensais.

A comparação dos resultados para os edifícios com layouts internos diferentes evidenciou que, para a situação de ventilação por efeito chaminé (vazão A) os edifícios com layout celular apresentaram melhor desempenho térmico do que os edifícios com planta livre, inclusive para os edifícios quadrados, cuja vazão de ar para a planta livre foi maior (7,1 vol/h, em comparação a 7vol/h para o layout celular).

De modo diverso, na situação com vento (vazão B) o desempenho térmico obtido para os edifícios com layout livre foi superior ao alcançado para as salas dos edifícios de layout celular. Para essa condição de ventilação, a vazão de ar apresentou-se como variável fundamental ao desempenho térmico dos edifícios analisados. Observam-se, nesses casos, os valores significativamente maiores das vazões de referência dos edifícios com planta livre, em virtude da ocorrência de ventilação cruzada.

Vale ressaltar que, de acordo com o modelo de conforto adaptativo adotado (ASHRAE 55, 2004), a condição de conforto em um determinado ambiente é função: das temperaturas do ambiente interno (TBS e TRM) e de sua relação com a temperatura do ar externo (tmm). As temperaturas internas, por sua vez, dependem: do projeto arquitetônico (forma, layout, orientação, propriedades termo-físicas dos materiais construtivos), da carga térmica interna de ocupação, da vazão do ar interno e das condições climáticas externas (temperatura do ar, direção e velocidade do vento, incidência de radiação solar no edifício).

Considerando os cenários de edifícios simulados, tem-se que:

- o projeto arquitetônico varia em quatro configurações de forma e layout interno (edifício retangular livre, edifício quadrado livre, edifício retangular celular e edifício quadrado celular), todas com a mesma especificação de materiais, e, para cada configuração, são consideradas oito orientações, resultando em 32 combinações;
- as vazões do ar interno foram calculadas para todos os edifícios analisados considerando seu projeto arquitetônico (32 combinações) e as condições de vento externo para cada orientação, abrangendo duas situações (totalizando 64 cenários);
- a carga térmica de ocupação é equivalente em todos os cenários (especificada por área de escritório, em  $W/m^2$ );
- todos os cenários estão expostos às mesmas condições de temperatura do ar externo.

Desse modo, pode-se dizer que, além do impacto da forma do edifício e do layout interno na condição de conforto, a ocorrência de resultados de porcentagem de conforto anual diferentes para ambientes com orientações distintas em um mesmo edifício, e para ambientes com mesma orientação em edifícios com configurações diferentes, evidencia o impacto da incidência de radiação solar nas fachadas - o que, por sua vez, reflete nos ganhos de calor por cada fachada; das vazões de ar em cada ambiente, e da influência desses parâmetros nas condições internas (TBS e TRM) das diferentes configurações de edifício.

Nesse contexto, o ganho de calor pela fachada e a vazão de ar interna são os únicos parâmetros que se alteram nas simulações das diferentes configurações de edifícios, já que as cargas térmicas de ocupação são equivalentes para todos os edifícios analisados, e todos eles estão expostos às mesmas condições de temperatura do ar externo.

Com relação aos ganhos de calor pela fachada, observa-se na Tabela 21 que o ganho total anual ( $Q_{\text{anual}}$ ) para os edifícios quadrados com layout livre (cenários 9 a 16, e 41 a 48) é cerca de 40% maior do que o ganho anual dos edifícios retangulares livres (cenários 1 a 8, e 33 a 40), para todas as orientações consideradas. Tal fato é decorrente da maior exposição dos edifícios quadrados de planta livre à radiação solar (compreendendo as quatro fachadas) em comparação ao edifício com planta livre retangular (o qual apresenta duas fachadas expostas) e área de escritórios

equivalente, e certamente contribuiu para a diferença de desempenho entre eles, como anteriormente mencionado, ainda que o edifício quadrado possibilite a colocação de um maior número de janelas em suas fachadas e a obtenção de maiores vazões de ar.

A análise dos ganhos de calor anuais pela fachada das salas dos edifícios com layout celular (as quais possuem áreas de piso e de fachada equivalentes) possibilita verificar as diferenças na incidência de radiação solar por orientação. Nota-se que as salas orientadas a S e a SO apresentam os menores valores de ganho solar anual<sup>128</sup>, semelhante para os edifícios quadrado e retangular. Essa situação está de acordo com a Figura 141 e a Figura 142, as quais ilustram que as orientações S e SO estão entre aquelas que recebem a menor incidência de radiação solar ao longo do ano e o menor período de insolação (horas), para a latitude de São Paulo. Desse modo, o menor ganho de calor solar ao longo do ano contribuiu para que todas as salas orientadas a S e a SO atingissem o critério de conforto térmico estipulado (cenários 18, 22, 26, 30, 50, 54, 58 e 62).

É possível perceber, ainda, que o valor de  $Q_{f\text{máx}}$  é proporcional ao ganho de calor total anual em cada orientação. Assim, o  $Q_{f\text{máx}}$  dos ambientes voltados a S e a SO é menor do que o valor dos escritórios orientados a N e a NE, por exemplo.

Com relação à vazão de ar, verificou-se que os cenários simulados com maiores vazões apresentaram resultados mais elevados. Esse fato pode ser constatado com a comparação de escritórios com mesma configuração de edifício e orientação, isto é, sujeitos à mesma incidência de radiação solar, simulados com vazões de ar diferentes. Cita-se como exemplo o edifício retangular com layout livre orientado a NS: a simulação com 6vol/h de vazão de ar obteve 63,9% das horas em conforto (vazão A, cenários 1 e 2), enquanto que o mesmo edifício com 74,3vol/h proporcionou 95,7% de horas em conforto, atingindo o critério estipulado (vazão B, cenários 33 e 34). Por outro lado, destaca-se o desempenho das salas dos edifícios retangulares e quadrados com layout celular, e orientações L e O. Como exemplo, a sala L do edifício retangular com 7,1vol/h de vazão de ar resultou em 62,9% de horas em conforto (vazão A, cenário 19), ao passo que a mesma sala com 1,5 vol/h apresentou apenas 13% de horas em conforto, aproximadamente um quinto do resultado anterior (vazão B, cenário 51). Deste modo, a influência da grandeza vazão de ar no desempenho térmico dos ambientes é ressaltada.

## 4.4. Considerações Finais

Com relação aos resultados das simulações computacionais, não apenas o total de horas ocupadas no ano que atendem a condição de conforto varia para cada cenário de análise, mas, também, as horas que se apresentam em conformidade com as condições desejáveis de conforto térmico podem acontecer em diferentes dias, em épocas do ano divergentes e em diferentes horas do dia, para cada cenário de edifício de escritórios.

Dos sessenta e quatro cenários de edifícios analisados apenas vinte e três apresentaram resultados compatíveis com o critério estipulado (de no mínimo 80% das horas ocupadas do ano em conformidade com as condições de conforto térmico).

Acredita-se que, para cada cenário de edifício, exista uma relação entre a vazão de ar possível e o ganho máximo de calor pela fachada ( $Q_{f\text{máx}}$ ) adequada, ou seja, que atenda às condições de conforto térmico desejadas. Para alcançar o critério estipulado, alterações podem ser realizadas no projeto arquitetônico dos edifícios de escritórios de referência para o incremento da vazão de ar interna e a redução dos ganhos de calor pela fachada<sup>129</sup>.

Para aumentar a vazão de ar interna podem ser testados, por exemplo, outros tipos de abertura, com maiores áreas efetivas para ventilação, além de diferentes arranjos e posicionamentos dessas aberturas. Já a redução dos ganhos de calor pode ser

[129] Podem existir casos (de configuração de edifício e condição de exposição) em que o limite máximo atingido pela relação *vazão de referência versus  $Q_{f\text{máx}}$*  ainda não proporcione um mínimo de 80% das horas ocupadas do ano em conformidade com as condições estipuladas de conforto, apenas com estratégias passivas. Para esses casos, recomenda-se a adoção de estratégias ativas complementares, em partes do ano, como parte de uma estratégia de condicionamento ambiental do edifício em modo-misto.

alcançada com a redução do wwr e/ou o sombreamento das superfícies transparentes das fachadas. O sombreamento da parte transparente da fachada pode ser feito com o uso de elementos de proteção solar externos, cuja aplicação é enfaticamente recomendada para edifícios de escritórios na cidade de São Paulo com base na avaliação do clima externo e em função da atividade desenvolvida (já pode ser considerada uma premissa de projeto para a obtenção de edifícios de escritórios com desempenho térmico e energético otimizado para o contexto climático em questão).

A quantidade e a escala das alterações necessárias bem como a compatibilização entre elas devem ser avaliadas caso a caso, mas a distância dos resultados obtidos com relação ao desejado (isto é, no mínimo 80% das horas ocupadas em conforto) pode ser considerada como um indicativo da magnitude da intervenção a ser realizada no projeto do edifício. Como exemplo, menciona-se um caso de edifício que apresentou 77,1% de horas em conforto (sala N do edifício quadrado celular na condição de ventilação por efeito de vento; cenários 57, vazão B), o qual demanda menores intervenções para o aprimoramento das condições internas e a (provável) obtenção de conforto em 80% das horas do ano, em comparação a um edifício com apenas 13% de resultado (edifício com layout celular L; cenário 51, vazão B).

Pode-se dizer que a porcentagem das horas ocupadas em conforto equivale ao período possível de ventilação natural do ambiente – ou seja, o período em que as condições desejáveis de conforto térmico são obtidas exclusivamente por meio da ventilação natural ou do condicionamento natural do edifício.

Entretanto, observa-se que todos os cenários que não alcançaram o critério de desempenho estipulado estão em conformidade com as condições de conforto por mais de 50% das horas ocupadas do ano (com exceção das salas dos edifícios retangulares e quadrados com layout celular orientadas a L e O). Isso equivale a dizer que nesses edifícios a ventilação natural é possível por mais da metade do período de ocupação anual. No período restante, as condições de conforto térmico devem ser obtidas por meios ativos.

Cabe ressaltar que os modelos de edifícios elaborados nesta pesquisa (modelos de referência) correspondem a projetos já otimizados sob o ponto de vista do desempenho térmico, com o intuito de maximizar o período de condicionamento natural interno, comparativamente a um edifício de escritórios tradicional existente hoje em São Paulo (operando integralmente com sistemas artificiais de condicionamento ambiental). Desse modo, a porcentagem do tempo na qual existe necessidade de utilização de estratégias ativas complementares para o condicionamento ambiental dos escritórios analisados é menor. Esse fato se reflete diretamente em economia da energia que seria necessária para o período adicional de funcionamento dos sistemas de climatização.

Segundo a prática europeia, a possibilidade de ventilação natural por 30% do ano corresponde ao período mínimo para a viabilidade econômica da especificação de fachadas com caixilhos móveis / operantes nos edifícios de escritórios (Marcondes, 2004).

Sendo assim, o resultado dessa avaliação evidencia a validade de analisar a implementação de uma estratégia de condicionamento ambiental em modo-misto para os edifícios de escritórios analisados que não atingiram o critério determinado, mas que apresentaram mais de 50% das horas do ano em conforto.

Para os escritórios avaliados com salas orientadas a Leste e a Oeste considerando vazão de ar por efeito de vento, em uma situação real, recomenda-se analisar as condições específicas de projeto e implantação, caso a caso, e avaliar a validade (ou não) de se implementar uma estratégia de condicionamento ambiental em modo-misto, tendo em vista os resultados apresentados, de 13% a 36,3% de horas do ano em conforto.

Contudo, enfatiza-se o impacto da fachada nas condições do ambiente interno, e

reforça-se a validade do projeto diferenciado de fachada para cada orientação de escritório, e para cada configuração de edifício.



# Capítulo 5



## Capítulo 5. Soluções projetuais de fachadas para edifícios de escritórios com ventilação natural

O projeto das soluções possíveis de fachada para o edifício de escritórios utiliza duas variáveis: a vazão de ar de referência ( $\Phi$ ) e o ganho máximo de calor pela fachada ( $Q_{f\max}$ ) que atende à condição de conforto térmico.

A vazão de ar de referência foi calculada no item 4.2 para cada cenário de análise, conforme duas condições de ventilação: vazão de ar por efeito chaminé (A) e vazão de ar por efeito de vento (B).

Já o maior valor de ganho de carga térmica devido à radiação solar no ambiente (pela fachada) foi detectado dentre as horas ocupadas em conforto, a partir dos resultados das simulações computacionais de cada edifício (item 4.3.4).

A Tabela 22 apresenta um resumo dessas duas variáveis para os 23 cenários de edifícios cujos resultados atingiram o critério de avaliação estipulado no item 4.1.1, ou seja, que estão em conformidade com as condições aceitáveis de conforto térmico por, no mínimo, 80% das horas ocupadas do ano.

Tabela 22. Vazão de ar de referência ( $\Phi$ ) e ganho máximo de calor pela fachada ( $Q_{f\max}$ ) para os vinte e três cenários de edifícios de escritórios avaliados que estão em conformidade com o critério de desempenho térmico.

**Tabela - resumo resultados: cenários que atendem critério**

Condição Ventilação	Configuração Edifício	Cenários			Conforto Anual (%)	Vazão ( $m^3/s$ )	Q $_{f\max}$ (W/m $^2$ fach)	
		nº	descrição	zona/sala				
<b>Vazão A</b> efeito chaminé	<b>Layout Celular</b>	18	PI Ret Celular	sala S	83,0	0,17	148,8	
		22	PI Ret Celular	sala SO	80,4	0,17	161,6	
		26	PI Quad Celular	sala S	81,0	0,17	142,0	
		30	PI Quad Celular	sala SO	79,5	0,17	154,1	
<b>Vazão B</b> efeito de vento	<b>Layout Livre</b>	33	PI Ret Livre	zona N	95,7	41,79	211,1	
		34		zona S			148,0	
		37	PI Ret Livre	zona NE	94,4	36,64	224,4	
		38		zona SO			152,8	
		39	PI Ret Livre	zona NO	89,4	25,66	187,4	
		40		zona SE			206,2	
		41	PI Quad Livre	zona N	83,6	48,81	230,4	
		42		zona S			146,4	
		43		zona L			258,8	
		44		zona O			173,6	
		45	PI Quad Livre	zona NE	82,6	42,74	257,2	
		46		zona SO			155,2	
		47		zona NO			209,6	
		48		zona SE			226,8	
		<b>Layout Celular</b>	49	PI Ret Celular	sala N	79,0	0,27	271,5
			50	PI Ret Celular	sala S	89,8	0,27	148,8
54	PI Ret Celular		sala SO	81,0	0,18	161,6		
58	PI Quad Celular		sala S	88,4	0,27	142,0		
62	PI Quad Celular		sala SO	80,1	0,18	154,1		

## 5.1. Procedimento para o dimensionamento de soluções de fachadas

O dimensionamento das soluções possíveis de fachada é realizado a partir dos valores de vazão de ar de referência ( $\Phi$ ) e ganho máximo de calor pela fachada ( $Q_{f\text{máx}}$ ), com base nas equações de cálculo de vazão de ar (eq 4-2, eq 4-4, eq 4-8) e de ganho de calor devido à radiação solar (Frota & Schiffer, 1995), para cada cenário. Diferentes arranjos de componentes podem ser testados nas equações, resultando em diferentes soluções de fachadas que permitem um ganho máximo de calor no ambiente equivalente ao  $Q_{f\text{máx}}$  de cada cenário, e as quais proporcionam uma vazão de ar mínima correspondente à respectiva vazão de referência.

### 5.1.1. Definição dos componentes opaco e transparente (ou translúcido), e a proporção entre eles ( $wwr$ )

O ganho de carga térmica devido à radiação solar depende do tipo do componente (opaco ou transparente/translúcido), da área do componente exposto à radiação solar, da sua orientação, da cor do seu revestimento externo e da velocidade do vento local.

Segundo Frota & Schiffer (1995), o ganho de calor devido à radiação solar pode ser calculado por:

$$Q = Q_{op} + Q_{tr} \quad (W) \quad \text{eq 5-1}$$

Onde:

**Q** é o ganho de carga térmica devido à radiação solar (direta e difusa) (W)

**Q<sub>op</sub>** é o ganho de carga térmica devido à radiação solar na área opaca (W)

**Q<sub>tr</sub>** é o ganho de carga térmica devido à radiação solar na área transparente ou translúcida (W)

Desse modo, na equação de ganho de calor solar (eq 5-1) são especificados os componentes opacos e transparentes/translúcidos que irão compor cada fachada, por meio de suas propriedades termo-físicas. São atribuídos valores de coeficiente global de transmissão térmica ( $U$ ) e coeficiente de absorção da radiação solar ( $\alpha$ ) para a parte opaca:

$$Q_{op} = A_{op} * U * \alpha * h_e^{-1} * Rad \quad (W) \quad \text{eq 5-2}$$

**A<sub>op</sub>** é a área do componente opaco da fachada (m<sup>2</sup>)

**U** é o coeficiente global de transmissão térmica (W/m<sup>2</sup> °C)

**$\alpha$**  é o coeficiente de absorção da radiação solar (associado à cor do revestimento externo)

**h<sub>e</sub>** é o coeficiente de condutância térmica da superfície externa do componente (W/m<sup>2</sup> °C)

$$h_e = h_c + h_r \quad \text{eq 5-3}$$

$h_c$  é o coeficiente de trocas térmicas por convecção ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ), o qual pode ser calculado em função da velocidade do ar externo:

$$h_c = 5,8 + 4,1 * v_{ext} \quad (\text{Edsl, 2004}) \quad \text{eq 5-4}$$

$v_{ext}$  é a velocidade do ar externo a 10m, registrada pela estação meteorológica (m/s)

$h_r$  é o coeficiente de trocas térmicas por radiação ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ )

Segundo Frota & Schiffer (1995), o coeficiente  $h_r$  é um parâmetro simplificado. Para materiais de construção correntes com emissividade térmica ( $\epsilon$ ) ao redor de 0,9, pode-se considerar  $h_r = 5$  ( $W/m^2 \text{ } ^\circ C$ ) (Frota & Schiffer, 1995, p. 34)

**Rad** é radiação solar global incidente na superfície ( $W/m^2$ )

Já para a parte transparente, é escolhido o componente transparente/translúcido - o qual, com frequência para fachadas de edifícios de escritórios, corresponde a um tipo de vidro - e a presença (ou não) de elemento de proteção solar, definindo-se um valor de fator solar (FS):

$$Q_{tr} = A_{tr} * FS * Rad \quad (W) \quad \text{eq 5-5}$$

**Atr** é a área do componente transparente ou translúcido ( $m^2$ )

**FS** é o fator solar do componente transparente ou translúcido

A proporção entre as partes ou *wwr* (*window to wall ratio*, como explicado no capítulo 1) é definida pelas respectivas áreas opaca ( $A_{op}$ ) e transparente (ou translúcida) ( $A_{tr}$ ) dos componentes da fachada.

Dentre as variáveis elencadas referentes aos componentes da fachada, destaca-se a importância da definição de FS<sup>130</sup> e de *wwr*, tendo em vista a magnitude da influência da parte transparente da fachada nos ganhos de calor transmitidos ao ambiente, em comparação à parte opaca. Tal fato é decorrente da ordem de grandeza dos parâmetros envolvidos nos cálculos dos ganhos por tipo de componente, sendo a parcela de ganho de calor transmitida pelos materiais opacos multiplicada por  $h_e^{-1}$ , variável da ordem de 0,05 (eq 5-2).

O parâmetro FS varia de 0 a 1. Quanto menor a transmissão total de calor pelo vidro, menor o valor de FS. Atualmente, diversos tipos de vidros são encontrados no mercado da construção civil (em diferentes cores, espessuras e tratamentos, como serigrafia e *coatings* de baixa emissividade, conforme mencionado no Cap 1), com alta variação nos valores de FS divulgados pelos fabricantes<sup>131</sup>. O vidro comum incolor é a referência de maior ganho de calor dentre os tipos de vidro existentes no mercado, com FS=0,86 (Frota, 1995).

Com a associação de elementos de proteção solar externos às superfícies transparentes

[130] O fator solar (FS) é a soma das parcelas de transmissão direta pelo vidro mais a parcela da energia absorvida e reirradiada para o interior, como mencionado no capítulo 1.

[131] Tendo em vista a intenção (ou discurso) cada vez mais frequente no contexto da arquitetura e da construção civil de aprimorar a eficiência energética e o desempenho térmico das edificações, verificam-se diferentes nomenclaturas para os novos tipos de vidro disponíveis no mercado, como por exemplo, os vidros para "controle solar". Geralmente tais vidros apresentam redução na sua transmissão direta de radiação solar e, em alguns casos, apresentam alta absortância – fator que deve ser considerado para escolha adequada do vidro, tendo em vista que parte da radiação absorvida por esse componente será retransmitida para o ambiente interno na forma de calor - o que pode resultar num FS maior do que o desejado.

da fachada, o FS do conjunto “vidro + proteção” cai consideravelmente, com valores da ordem de 0,09 a 0,25. O FS resultante vai depender da composição dos elementos sombreadores (forma, espaçamento, cor) e da sua eficiente aplicação na fachada, ou seja, do correto dimensionamento para sombrear a superfície envidraçada.

A Tabela 23 traz valores de FS para alguns tipos de vidro e para elementos de proteção solar associados a vidros comuns transparentes.

A influência do wwr no ganho solar no ambiente interno (e, como consequência, no desempenho térmico do edifício) pode ser constatada com o aumento do wwr das fachadas de um dos edifícios analisados. Considerando-se o edifício retangular livre NS (cenários 33 e 34), os resultados da simulação termodinâmica deste escritório com 100% de wwr nas fachadas principais para as situações com vazão de ar por efeito chaminé (vazão A) e por efeito de vento (vazão B), mantendo-se o mesmo tipo de vidro (FS=0,8), pode ser observado na Tabela 24, comparativamente ao cenário anteriormente avaliado, com wwr=50%.

Nota-se que o aumento do ganho solar total no escritório ao longo do ano é praticamente proporcional ao aumento de 50% de wwr, passando de 98,8MW para 188,8MW. Para a situação com maior vazão de ar (74,3vol/h), a porcentagem anual de horas ocupadas em conforto reduziu aproximadamente 10% com o aumento do wwr da fachada do edifício (de 95,7% para 85,9%). Em contrapartida, na situação com vazão de ar reduzida (6,1vol/h), o impacto do aumento do wwr e, conseqüentemente, dos ganhos de calor solar no ambiente, é maior, ocorrendo uma redução de 50% na porcentagem de conforto anual (de 63,9% para 31,7%).

Tabela 23. FS de alguns tipos vidros e elementos de proteção solar (elaborada a partir de Frota & Schiffer, 1995; Lamberts et al., 1997; e Carmody, 2004)

#### Fator Solar

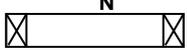
Tipos de vidro	FS		
vidro comum incolor	0,86		
vidro simples incolor 6mm	0,83		
vidro laminado incolor 8mm	0,80		
vidro verde 6mm	0,60		
vidro com cerigrafia cerâmica em pontos (preenchimento 40% superfície, cor clara)	0,64		
vidro com cerigrafia cerâmica em linhas (preenchimento 50% superfície, cor clara)	0,59		
vidro incolor <i>low-e</i>	0,32		
Dispositivos de proteção solar *			
	cor do elemento		
	clara	média	preto
veneziana vertical madeira	0,05	0,08	0,13
veneziana vertical metálica	0,07	0,10	0,16
veneziana horizontal madeira	0,10	0,11	0,14
veneziana horizontal metálica	0,09	0,09	0,12
brise horizontal tipo "marquise" **			

\* para vidros transparentes com FS=0,85

\*\* toda superfície está sombreada

Tabela 24. Influência do wwr nos ganhos de calor e no desempenho térmico do ambiente de escritórios; análise comparativa para o edifício retangular livre NS: porcentagem anual de conforto e ganho de calor solar total anual ( $Q_{T\text{anual}}$ )

### Edifício Retangular Livre NS

	Vazão A - ef chaminé	Vazão B - ef vento	$Q_{T\text{anual}}$ (MW)
	6,1 vol/h	74,3 vol/h	
<b>wwr50%</b>	63,9%	95,7%	98,8
<b>wwr100%</b>	31,7%	85,9%	188,8

A partir de eq 5-1, dividindo-se o ganho de calor devido à radiação solar ( $Q$ ) pela área total da fachada ( $A_{\text{fach}}$ ), obtém-se o ganho solar por área de fachada ( $Q_f$ ):

$$Q_f = \frac{Q_{op} + Q_{tr}}{A_{\text{fach}}} \quad (\text{W/m}^2\text{fach}) \quad \text{eq 5-6}$$

Onde:

$Q_f$  é o ganho de carga térmica devido à radiação solar, por área de fachada ( $\text{W/m}^2\text{fach}$ )

$A_{\text{fach}}$  é a área total da fachada ( $\text{m}^2$ )

$$A_{\text{fach}} = A_{op} + A_{tr} \quad (\text{m}^2) \quad \text{eq 5-7}$$

Como o wwr é representado pela proporção de superfícies transparentes em relação às opacas (isto é, uma fachada com wwr=60% tem 60% de sua área total composta por materiais transparentes ou translúcidos), tem-se que:

$$A_{tr} = \text{wwr} * A_{\text{fach}} \quad (\text{m}^2) \quad \text{eq 5-8}$$

De eq 5-7 e eq 5-8:

$$A_{op} = A_{\text{fach}} - (\text{wwr} * A_{\text{fach}}) \Rightarrow A_{op} = (1 - \text{wwr}) * A_{\text{fach}} \quad (\text{m}^2) \quad \text{eq 5-9}$$

E, portanto:

$$Q_f = \frac{[(1 - \text{wwr}) * A_{\text{fach}} * U * \alpha * \text{Rad} * h_{e^{-1}}] + (\text{wwr} * A_{\text{fach}} * \text{FS} * \text{Rad})}{A_{\text{fach}}} \quad (\text{W/m}^2\text{fach})$$

eq 5-10

Para cada cenário de edifícios de escritórios avaliado, o maior valor de ganho de calor solar por área de fachada ( $Q_f$ ) encontrado dentre o conjunto de horas ocupadas em conforto foi chamado de  $Q_{f\text{máx}}$  (Tabela 22).

Para utilização dos dados de ganhos de calor solar extraídos das simulações computacionais com o programa TAS na equação de Frota (1995) realizou-se uma comparação entre os dois modelos de cálculo em questão. Tomou-se como base a solução de fachada considerada nas simulações dos edifícios de escritórios, na hora de  $Q_{f\text{máx}}$ . Deste modo, o ganho de calor devido à radiação solar para um ambiente cuja fachada apresenta  $wwr=50\%$ , parte transparente com  $FS=0,8$ , e parte opaca com  $U=2,0W/m^2C$  e  $\alpha=0,3$ , foi calculado com base na equação proposta em Frota (eq 5-10) para os vinte e três cenários de análise.

Os valores de Rad foram extraídos das simulações de cada cenário, para as respectivas horas de  $Q_{f\text{máx}}$ . No cálculo do ganho de calor devido à radiação solar no programa TAS, a variável Rad é composta pela soma da radiação direta e da radiação difusa incidentes na superfície de cada fachada, acrescida da parcela de radiação refletida pelo solo que por ventura atinja esta superfície (Edsl, 2004, p. 47).

A variável  $he^{-1}$  foi calculada para os vinte e três casos, a partir dos dados de velocidade do ar externo presentes no banco de dados climáticos, para cada dia e hora em questão.

A Tabela 25 traz os valores de Rad e  $he^{-1}$  para a hora de  $Q_{f\text{máx}}$ .

Os resultados do cálculo de  $Q_f$  a partir da equação de Frota (1995) e os resultados das simulações computacionais ( $Q_{f\text{máx}}$ ) são apresentados na Tabela 26. Como esperado, a comparação entre esses resultados aponta valores maiores obtidos com o modelo de cálculo proposto em Frota (1995), em comparação aos resultados das simulações computacionais com o TAS.

Esse fato decorre, principalmente, das condições de contorno consideradas em cada modelo de cálculo. O programa TAS realiza uma simulação dinâmica, na qual o balanço térmico de um ambiente em determinado momento considera a influência das trocas térmicas ocorridas nos momentos anteriores (além das trocas térmicas ocorridas nos demais ambientes do edifício, simultaneamente). Já o cálculo de ganho de calor segundo modelo proposto em Frota (1995) considera as trocas térmicas para um exato momento, numa condição estática.

Sendo assim, pode-se dizer que o cálculo de ganho de calor com o método de Frota compreende uma “margem de segurança”, por considerar uma condição “mais crítica” que, provavelmente, não se repete com frequência ao longo do ano.

Para o presente trabalho, aplicou-se um fator de correção aos dados de  $Q_{f\text{máx}}$  extraídos das simulações para sua utilização na equação de Frota (1995) como parte do procedimento para o dimensionamento de soluções possíveis de fachada para cada cenário de edifício.

Observou-se um padrão de variação na diferença entre os resultados dos respectivos modelos de cálculo, para os cenários de estudo considerados, em função da configuração do edifício (forma e layout interno). Verificou-se que os resultados de ganho de calor calculados com base em Frota (1995), comparativamente aos extraídos das simulações computacionais, são, em média, 4% maiores para as salas dos edifícios com layout celular (variando de 1% a 9%), 24% maiores para os edifícios retangulares de layout livre (de 18% a 37%), e 18% maiores para os edifícios quadrados livres (com variação de 18% a 22%).

Atribuiu-se um fator de correção, por configuração de edifício, equivalente à menor variação de resultados verificada na comparação de modelos de cálculo. Intencionou-se, desse modo, garantir que as soluções de fachada a serem dimensionadas de

Tabela 25. Valores de Rad ( $W/m^2$ ) e  $he^{-1}$  ( $W/m^2\text{°C}$ ) para hora de  $Q_{f\text{máx}}$  dos respectivos cenários de análise

Cenários				$he^{-1}$ ( $W/m^2\text{°C}$ )	Rad ( $W/m^2$ )	Data	Hora
18	PI Ret Celular	sala	S	0,03	370	23/nov	11
22	PI Ret Celular	sala	SO	0,05	423	21/nov	15
26	PI Quad Celular	sala	S	0,03	349	23/nov	11
30	PI Quad Celular	sala	SO	0,05	401	21/nov	15
33	PI Ret Livre	zona	N	0,06	670	03/jul	12
34		zona	S	0,03	363	23/nov	11
37	PI Ret Livre	zona	NE	0,07	731	06/ago	10
38		zona	SO	0,02	445	14/dez	15
39	PI Ret Livre	zona	NO	0,02	590	14/ago	14
40		zona	SE	0,04	649	28/nov	8
41	PI Quad Livre	zona	N	0,03	669	02/jul	12
42		zona	S	0,03	372	23/nov	11
43		zona	L	0,04	752	28/nov	8
44		zona	O	0,05	495	21/nov	15
45	PI Quad Livre	zona	NE	0,05	757	26/jul	10
46		zona	SO	0,05	442	26/dez	14
47		zona	NO	0,03	618	14/jun	14
48		zona	SE	0,04	665	28/nov	8
49	PI Ret Celular	sala	N	0,05	673	03/jul	11
50	PI Ret Celular	sala	S	0,03	370	23/nov	11
54	PI Ret Celular	sala	SO	0,05	423	21/nov	15
58	PI Quad Celular	sala	S	0,03	349	23/nov	11
62	PI Quad Celular	sala	SO	0,05	401	21/nov	15

acordo com o procedimento ora proposto apresentem um ganho de calor menor ou igual ao respectivo  $Q_{f\text{máx}}$ . Desse Aplicou-se o fator de correção de 1,18 apenas ao  $Q_{f\text{máx}}$  dos cenários de edifícios com layout livre, tanto retangulares quanto quadrados – com exceção dos casos orientados a Sul, os quais apresentaram boa correlação entre os dois modelos de cálculo. Tendo em vista a variação de 1% a 9% referente aos edifícios com layout celular, julgou-se desnecessário aplicar uma correção de 1% ao  $Q_{f\text{máx}}$  desses cenários de edifícios.

Os resultados de  $Q_{f\text{máx}}$  corrigidos são apresentados na Tabela 27.

Partindo-se de eq 5-8 e fixando-se um valor para o parâmetro “ $U \times \alpha$ ” referente ao componente opaco da fachada (isto é, definindo-se o material opaco), é possível estabelecer uma correlação entre  $w_{wr}$  e FS, para cada condição de  $Q_{f\text{máx}}$ , ou seja, para cada fachada dos diferentes edifícios.

A título de exemplo, as Figuras 156 a 160 trazem gráficos com a correlação “ $w_{wr} \times FS$ ” para os vinte e três cenários de edifícios de análise finais, estabelecida com base nos valores de  $Q_{f\text{máx}}$  corrigidos da Tabela 27 para fachadas com “ $U \times \alpha = 0,6$ ”. Este valor é obtido, por exemplo, com uma parede de bloco de concreto de 0,2m de espessura, com revestimento interno e externo em argamassa e pintura externa em cor clara:  $U=2,0W/m^2\text{°C}$  e  $\alpha = 0,3$  (equivalente ao especificado para os modelos de edifício de referência da pesquisa).

Adicionalmente, gráficos para os vinte e três cenários de edifícios de estudo, com a correlação “ $w_{wr} \times FS$ ” válida para fachadas com “ $U \times \alpha = 1$ ”, encontram-se no Apêndice D. A correlação em questão correspondente à parede de bloco de concreto

anteriormente mencionada com revestimento externo em chapas de alumínio (encontrado em diversos edifícios de escritórios existentes na cidade de São Paulo), apresentando  $U=2,1\text{W/m}^2\text{C}$  e  $\alpha = 0,5$ .

Ressalta-se que os gráficos em questão apresentam o valor máximo de FS a ser usado na solução de fachada de cada cenário, para garantir um ganho de calor solar no ambiente menor ou igual ao  $Q_{f\text{máx}}$  correspondente.

Os valores da radiação solar global (Rad) utilizados foram extraídos das simulações computacionais para a hora de  $Q_{f\text{máx}}$ , em cada caso, e os respectivos coeficientes  $h_{e^{-1}}$  calculados conforme a velocidade do ar externo ( $v_{\text{ext}}$ ) – ambos anteriormente apresentados na Tabela 25.

Com base no gráfico da Figura 156, referente à situação de ventilação por efeito chaminé (vazão A) dos edifícios com layout celular, nota-se que uma fachada com  $wwr=60\%$  admite  $FS=0,62$  nas salas orientadas a SO tanto do edifício retangular quanto do edifício quadrado, o que pode ser atendido com um vidro verde de 6mm (Tabela 23). Reduzindo-se o  $wwr$  (isto é, a quantidade de vidro ou superfícies transparentes) na fachada, valores maiores de FS são permitidos. Como exemplo, partindo-se de  $wwr=45\%$  as fachadas das salas em questão podem ter FS de 0,81 e 0,82, respectivamente, permitindo o uso de um vidro laminado de 8mm.

Tabela 26. Resultados de ganho de calor para uma mesma fachada: cálculo com método proposto em Frota (1995) e valores extraídos das simulações computacionais com o programa TAS

Cenários				Qf (W/m <sup>2</sup> fach) calc. Frota (1995)	Qf <sub>máx</sub> (W/m <sup>2</sup> fach) TAS
18	PI Ret Celular	sala	S	151,3	148,8
22	PI Ret Celular	sala	SO	175,5	161,6
26	PI Quad Celular	sala	S	142,8	142,0
30	PI Quad Celular	sala	SO	166,4	154,1
33	PI Ret Livre	zona	N	280,0	211,1
34		zona	S	148,1	148,0
37	PI Ret Livre	zona	NE	307,6	224,4
38		zona	SO	180,6	152,8
39	PI Ret Livre	zona	NO	240,4	187,4
40		zona	SE	267,7	206,2
41	PI Quad Livre	zona	N	273,7	230,4
42		zona	S	151,9	146,4
43		zona	L	310,6	258,8
44		zona	O	205,5	173,6
45	PI Quad Livre	zona	NE	313,2	257,2
46		zona	SO	183,3	155,2
47		zona	NO	252,5	209,6
48		zona	SE	274,6	226,8
49	PI Ret Celular	sala	N	279,2	271,5
50	PI Ret Celular	sala	S	151,3	148,8
54	PI Ret Celular	sala	SO	175,5	161,6
58	PI Quad Celular	sala	S	142,8	142,0
62	PI Quad Celular	sala	SO	166,4	154,1

Tabela 27. Valores de  $Q_{f\max}$  corrigidos para utilização na equação de ganho de calor proposta em Frota (1995)

Cenários				Fator de Correção	Q <sub>f</sub> máx corrigido (W/m <sup>2</sup> fach)
nº	descrição	zona/sala			
18	PI Ret Celular	sala	S	-	148,8
22	PI Ret Celular	sala	SO	-	161,6
26	PI Quad Celular	sala	S	-	142,0
30	PI Quad Celular	sala	SO	-	154,1
33	PI Ret Livre	zona	N	1,18	<b>249,1</b>
34		zona	S	- * *	148,0
37	PI Ret Livre	zona	NE	1,18	<b>264,8</b>
38		zona	SO	1,18	<b>180,3</b>
39	PI Ret Livre	zona	NO	1,18	<b>221,1</b>
40		zona	SE	1,18	<b>243,3</b>
41	PI Quad Livre	zona	N	1,18	<b>271,9</b>
42		zona	S	- * *	146,4
43		zona	L	1,18	<b>305,4</b>
44		zona	O	1,18	<b>204,9</b>
45	PI Quad Livre	zona	NE	1,18	<b>303,5</b>
46		zona	SO	1,18	<b>183,1</b>
47		zona	NO	1,18	<b>247,3</b>
48		zona	SE	1,18	<b>267,6</b>
49	PI Ret Celular	sala	N	-	271,5
50	PI Ret Celular	sala	S	-	148,8
54	PI Ret Celular	sala	SO	-	161,6
58	PI Quad Celular	sala	S	-	142,0
62	PI Quad Celular	sala	SO	-	154,1

\* os casos com orientação S apresentaram boa correlação entre os dois modelos de cálculo

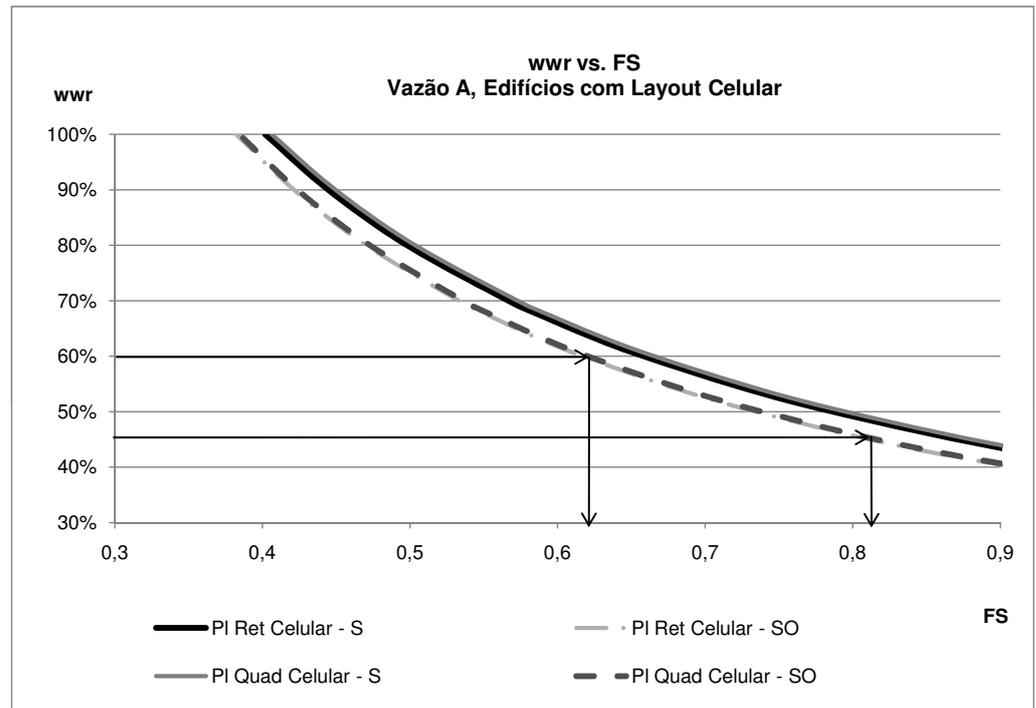


Figura 156. Valores de wwr e FS para fachadas dos cenários de edifícios com layout celular e vazão A (cenários 18, 22, 26 e 30), válidos para “ $U_{\alpha} = 0,6$ ”

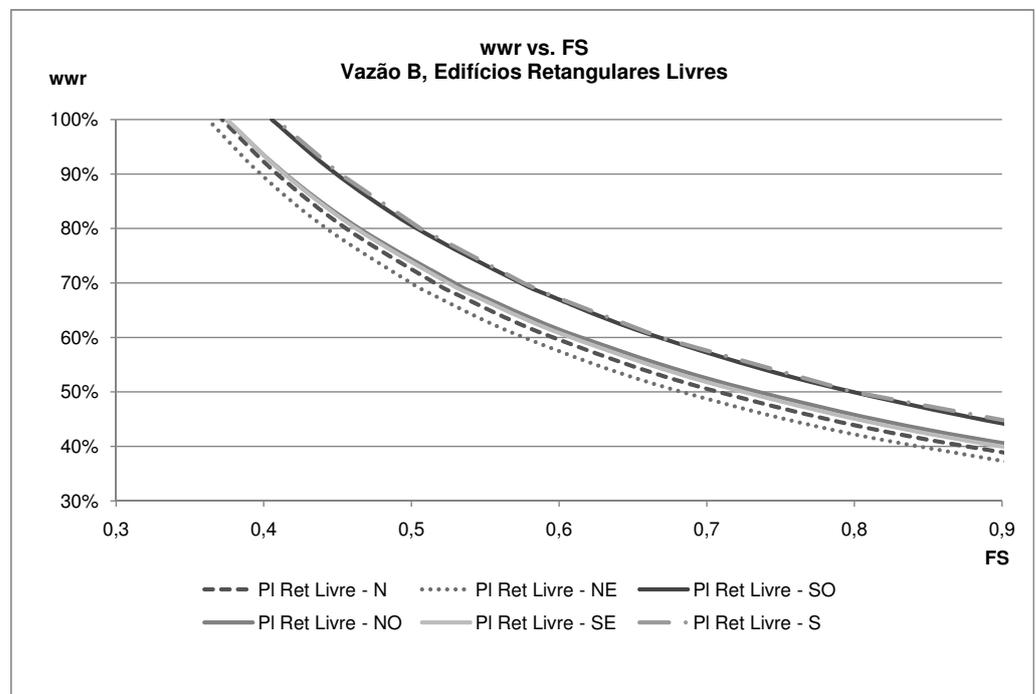


Figura 157. Valores de wwr e FS para fachadas dos cenários de edifícios retangulares livres e vazão B (cenários 33, 34, 37, 38, 39 e 40), válidos para “ $U_{\alpha} = 0,6$ ”

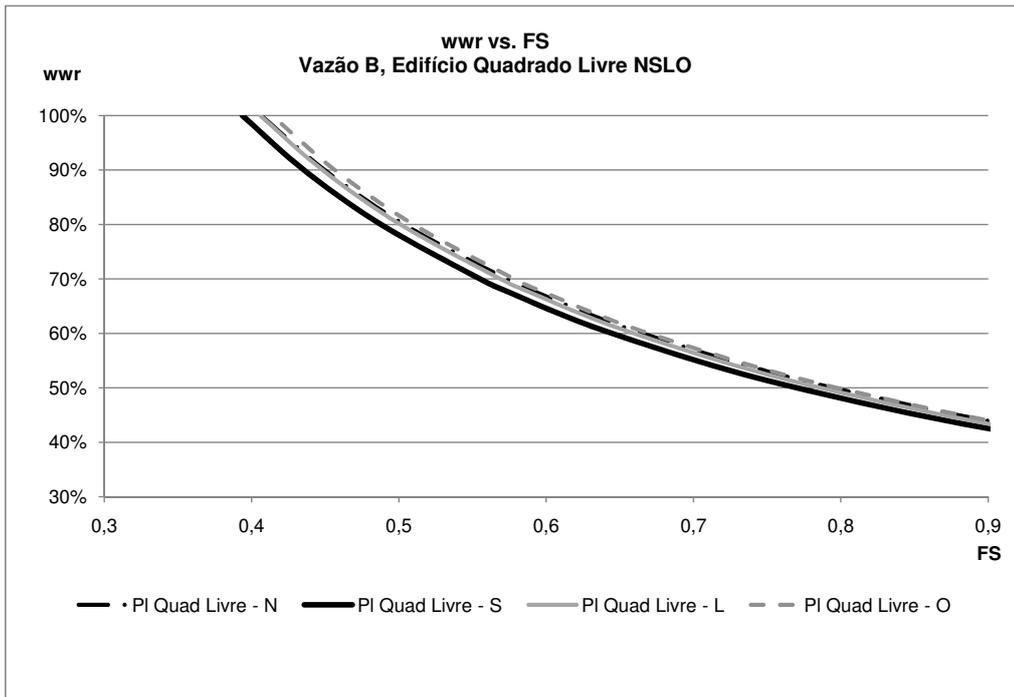


Figura 158. Valores de wwr e FS para fachadas dos cenários do edifício quadrado livre NSLO na vazão B (cenários 41 a 44), válidos para “ $U_{x\alpha} = 0,6$ ”

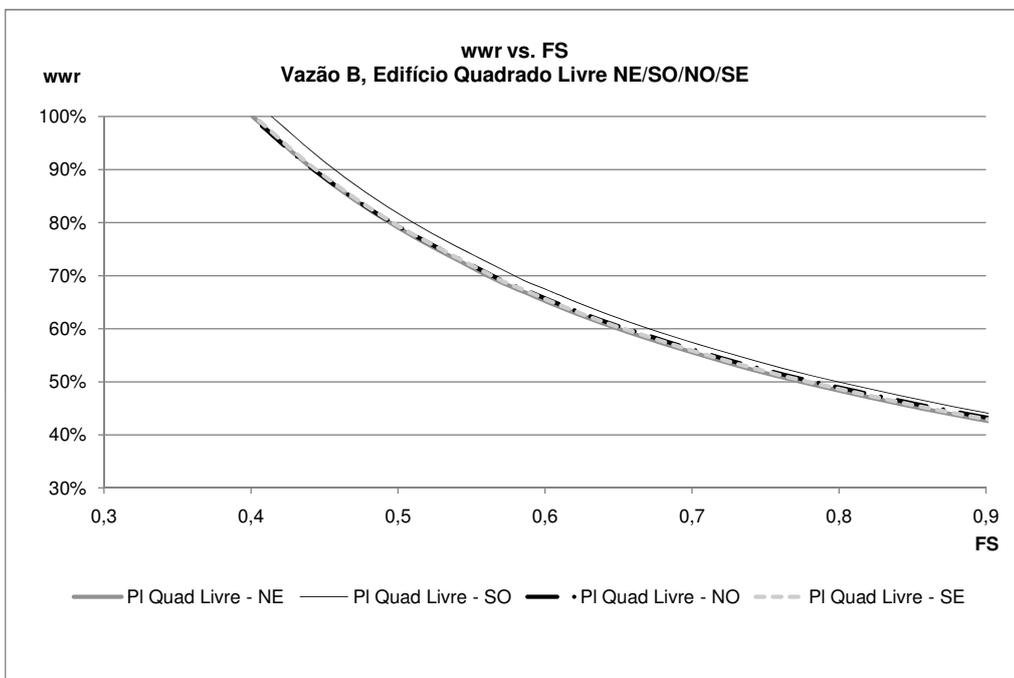


Figura 159. Valores de wwr e FS para fachadas dos cenários do edifício quadrado livre NE/SO/NO/SE na vazão B (cenários 45 a 48), válidos para “ $U_{x\alpha} = 0,6$ ”

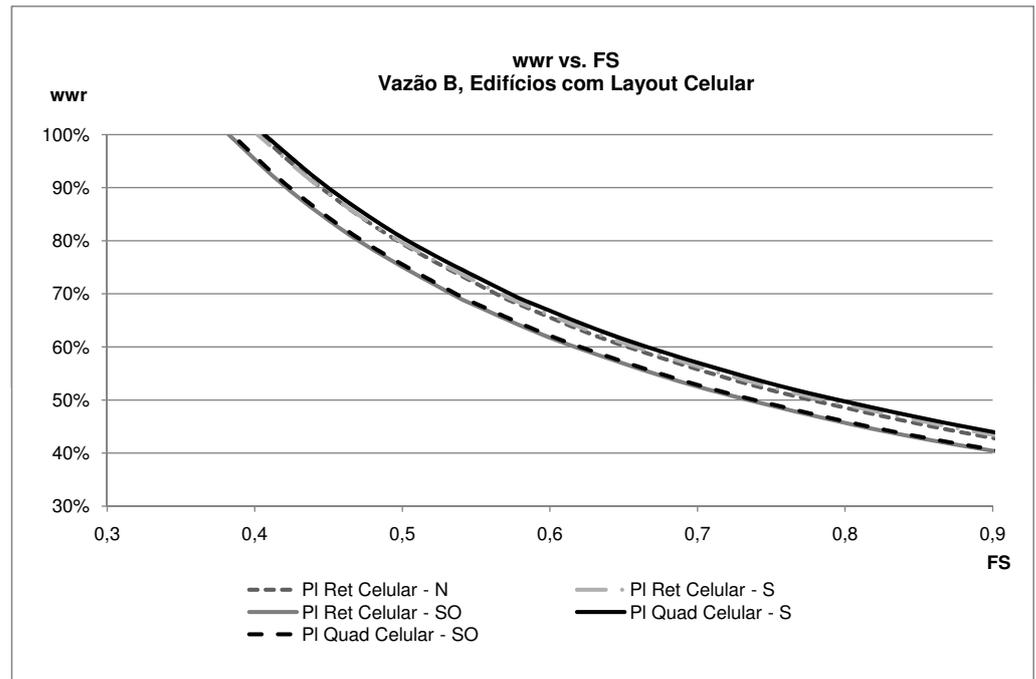


Figura 160. Valores de wwr e FS para fachadas dos cenários de edifícios com layout celular e vazão B (cenários 49, 50, 54, 58 e 62), válidos para “ $Ux\alpha = 0,6$ ”

### 5.1.2. Definição do tipo de abertura da fachada, dimensionamento e posicionamento

O tipo de abertura da fachada para ventilação natural do edifício é definido e dimensionado com a equação de vazão de ar, por ambiente de escritório, sendo utilizadas equações específicas para cada condição de ventilação - vazão de ar por efeito chaminé ou por efeito de vento, conforme apresentado no capítulo 4. Para a ventilação por efeito de vento, são utilizadas duas equações distintas com relação à configuração interna do edifício – com layout livre ou celular, e o posicionamento e/ou a distribuição das aberturas no ambiente - em uma superfície ou em superfícies opostas.

As equações de vazão de ar utilizadas são:

- vazão de ar por efeito chaminé (vz A) (Frota & Schiffer, 1995):

$$\Phi_{ch} = 0,14 \times A_{ch} \times \sqrt{(H_1 \times \Delta T_1)} \quad \text{m}^3/\text{s} \quad \text{eq 4-2}$$

Onde:

$A_{ch}$  corresponde à área da menor abertura, seja a de entrada ou a de saída do ar ( $\text{m}^2$ )

$H_1$  é a distância entre o centro das aberturas de entrada e saída do ar (m)

$$\Delta T_1 = (1-m) \Delta T \quad \text{eq 4-3}$$

m é o coeficiente de amortecimento, vinculado à inércia do ambiente

$\Delta T$  é a diferença entre a temperatura do ar interna e externa

- vazão de ar por efeito de vento (vz B), ambiente com planta livre e aberturas em superfícies opostas (ventilação cruzada) (BS 5925, 1991):

$$\Phi_V = C_d \times A_o \times V \sqrt{\Delta C_p} \quad \text{m}^3/\text{s} \quad \text{eq 4-4}$$

Onde:

**Cd** é o coeficiente de perda de carga da abertura; valor entre 1 e 0 que fornece a parcela útil da energia para a ventilação. O valor comumente utilizado para Cd é 0,6. (Frota & Schiffer, 1995; Cóstola, 2006; Alucci, 2007)

**Ao** é a área equivalente de aberturas para ventilação, calculada por:

$$\frac{1}{(A_o)^2} = \frac{1}{(A_e)^2} + \frac{1}{(A_s)^2} \quad \text{m}^2 \quad \text{eq 4-5}$$

**Ae** é a área de entrada do vento

**As** é a área de saída do vento

**V** velocidade do ar externo, corrigida em função da direção de incidência (Frota & Schiffer, 1995), calculada por:

$$V = V_o * \cos \Theta \quad \text{m/s} \quad \text{eq 4-6}$$

**Θ** é o ângulo de incidência do vento com relação à abertura

**Vo** é a velocidade do ar externo corrigida para as características do tecido urbano e da altura do ponto de análise, calculada (BS 5925, 1991) por:

$$V_o = v_{\text{ext}} * K * Z^a \quad \text{m/s} \quad \text{eq 4-7}$$

**v<sub>ext</sub>** é a velocidade do vento registrada na estação meteorológica, a 10m de altura

**K, a** são parâmetros em função do perfil do terreno, indicados na Tabela 17

Para o contexto urbano:

$$K = 0,35$$

$$a = 0,25$$

**Z** é altura do ponto onde se deseja determinar a velocidade do vento (m)

[132] Valores de abertura efetiva indicados em CIBSE LG10 (1999), CIBSE AM10 (2005) e em informação verbal fornecida por Frota, em 2007.

$\Delta C_p$  é a diferença entre os coeficientes de pressão ( $C_p$ ) de entrada ( $C_e$ ) e saída de ar ( $C_s$ ) na abertura

- vazão de ar por efeito de vento (vz B), ambiente com layout celular e abertura em uma superfície (BS 5925, 1991):

$$\Phi_v = 0,025 \times A_o \times V \quad \text{m}^3/\text{s} \quad \text{eq 4-8}$$

O valor de  $H_1$  é definido em função das aberturas de entrada e saída do ar; o valor da velocidade do ar na abertura ( $V$ ) e a diferença dos coeficientes de pressão ( $\Delta C_p$ ) foram calculados no item 4.2;  $\Delta T_1$  é calculado com base na diferença entre as temperaturas do ar externo e interno ( $\Delta T$ ) extraídas das simulações computacionais, para hora de  $Q_{f\text{máx}}$ ; e  $C_d = 0,6$  (Frota & Schiffer, 1995).

Baseando-se na equação de cálculo de vazão de ar (eq 4-2, eq 4-4 ou eq 4-8), dependendo da configuração de edifício) obtém-se a área de abertura necessária para cada vazão de ar de referência dos edifícios de escritórios,  $A_{ch}$  ou  $A_o$ . Cabe ressaltar que, diferentemente das equações de ganho de calor, que são utilizadas separadamente para cada fachada do edifício, a equação de vazão de ar considera o ambiente de escritórios integralmente, e, portanto, a área de abertura obtida por essa equação refere-se à soma das aberturas localizadas em todas as fachadas do ambiente em questão. Ou seja, a área de abertura necessária deve ser garantida pela soma da(s) área(s) da(s) abertura(s) de uma fachada nas salas, de duas fachadas nos edifícios retangulares de planta livre, e de quatro fachadas nos escritórios quadrados com layout livre.

É possível posicionar a abertura na parte transparente da fachada, como uma janela convencional, ou então na parte opaca, devendo atentar para a compatibilidade entre a área de abertura necessária para ventilação natural, a área total da janela (ou abertura) escolhida e a área da superfície em questão – transparente ou opaca, de acordo com o wwr estabelecido.

No caso da utilização de janelas convencionais, para a condição de ventilação por efeito de vento (vazão B), a área de abertura necessária  $A_o$  é equivalente à área de abertura efetiva para ventilação (a qual corresponde, por sua vez, a uma porcentagem da área total da janela), em função do tipo de janela. A partir do valor de abertura devido a cada cenário de edifício ( $A_o$ ) e da abertura efetiva proporcionada por uma janela pode-se estabelecer a área mínima de janela necessária no ambiente, por tipo de janela escolhido.

Na Tabela 28 são exemplificados cinco tipos de janelas e suas respectivas áreas de abertura efetiva consideradas<sup>132</sup>. Para os dezenove cenários de edifícios de análise sob vazão de ar por efeito de vento (vazão B), as áreas mínimas de janela necessárias por fachada, abrangendo os tipos de janelas listados, podem ser estabelecidas nos gráficos das Figuras 161 a 164 de acordo com a configuração do edifício.

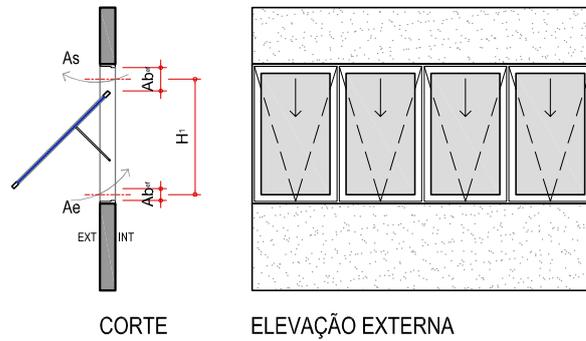
Nota: Para facilitar a leitura dos gráficos das Figuras 161, 162 e 163, referentes aos edifícios com planta livre, esses já apresentam o resultado da área de janela necessária ao escritório discriminada por fachada - ou seja, a área mínima de janela obtida com base no cálculo de  $A_o$  foi dividida por dois para os edifícios retangulares e por quatro para os edifícios quadrados. Os demais casos referentes a salas de edifícios com layout celular já compreendem apenas uma fachada exposta por escritório.

Com relação aos cenários de edifícios sob vazão de ar por efeito chaminé (vazão A), a escolha do tipo de janela a ser utilizada não considera a abertura efetiva total da janela. Nesse caso, deve-se considerar a área da menor abertura ( $A_{ch}$ ), seja a de entrada ou a de saída do ar, e a distância entre o centro das aberturas ( $H_1$ ).

Tabela 28. Tipos de janela e área de abertura efetiva considerada

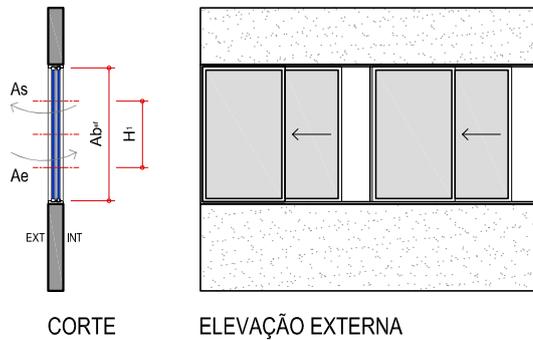
**J1 - maxim-ar**

Abertura efetiva: 30%



**J2 - "de correr" horizontal**

Abertura efetiva: 45%



**J3 - basculante alta + basculante central**

Abertura efetiva: 30%

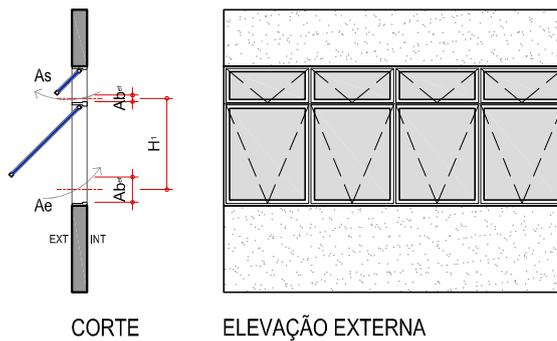
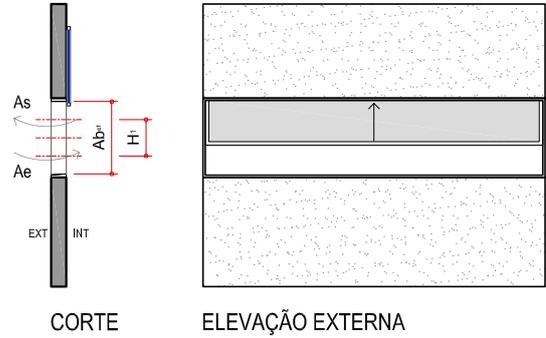


Tabela 28. Tipos de janela e área de abertura efetiva considerada; continuação

**J4 - guilhotina (ou "de correr" vertical)**

Deslizamento por trás da estrutura

Abertura efetiva: 90%



**J5 - veneziana**

Abertura efetiva: 20%

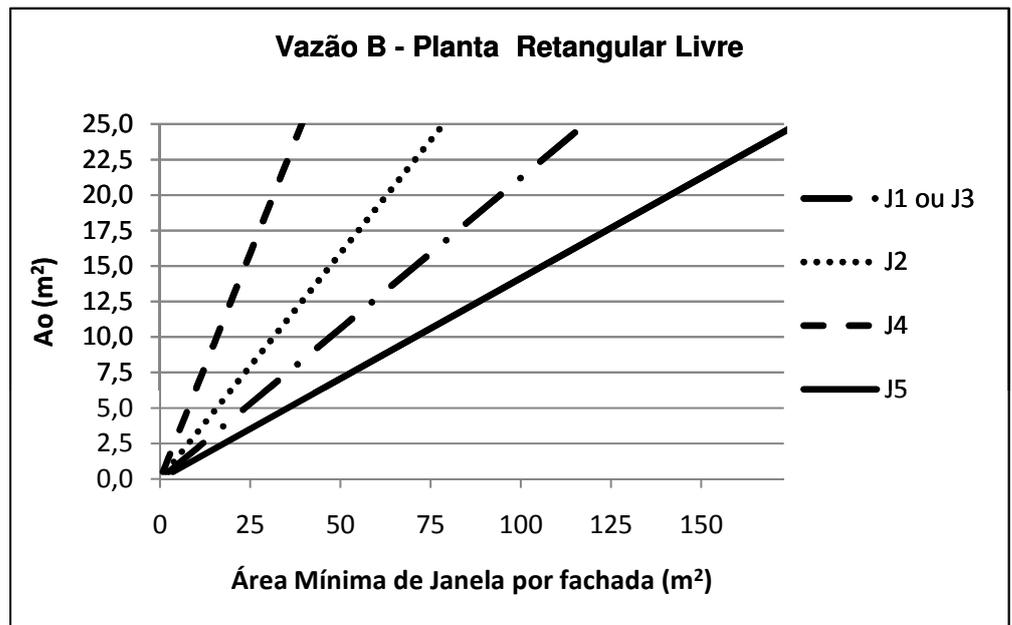
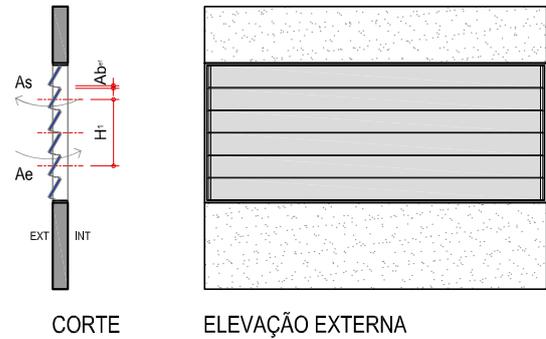


Figura 161. Ao x área mínima de janela para uma fachada dos cenários de edifícios de análise com vazão de ar por efeito de vento (Vazão B), por tipos de janela: planta retangular livre

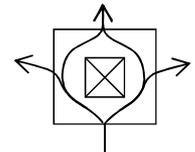
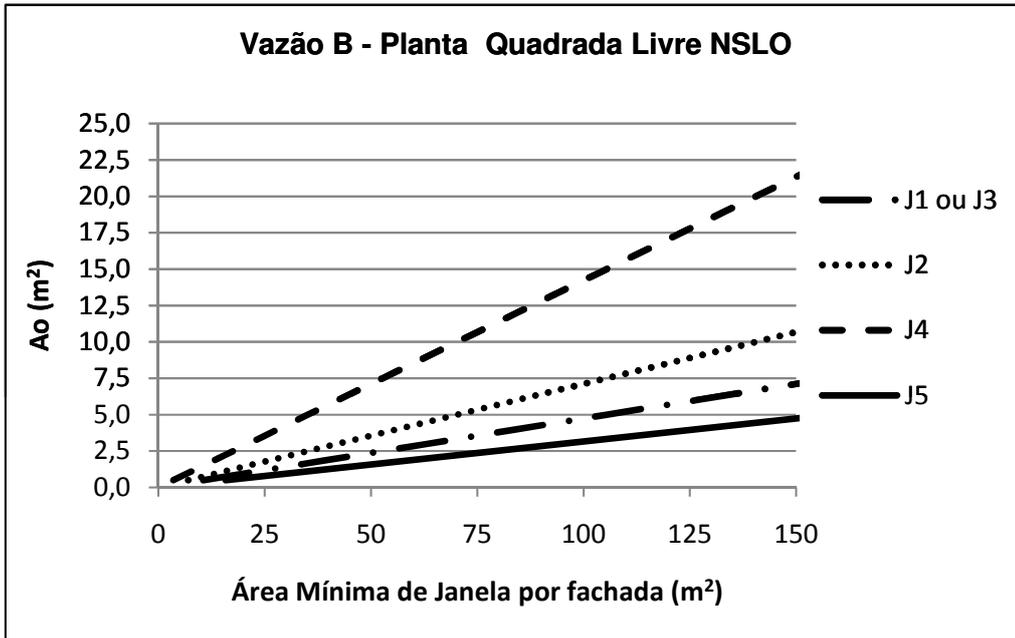


Figura 162. Ao x área mínima de janela para uma fachada dos cenários de edifícios de análise com vazão de ar por efeito de vento (Vazão B), por tipos de janela: planta quadrada livre NSLO

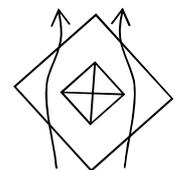
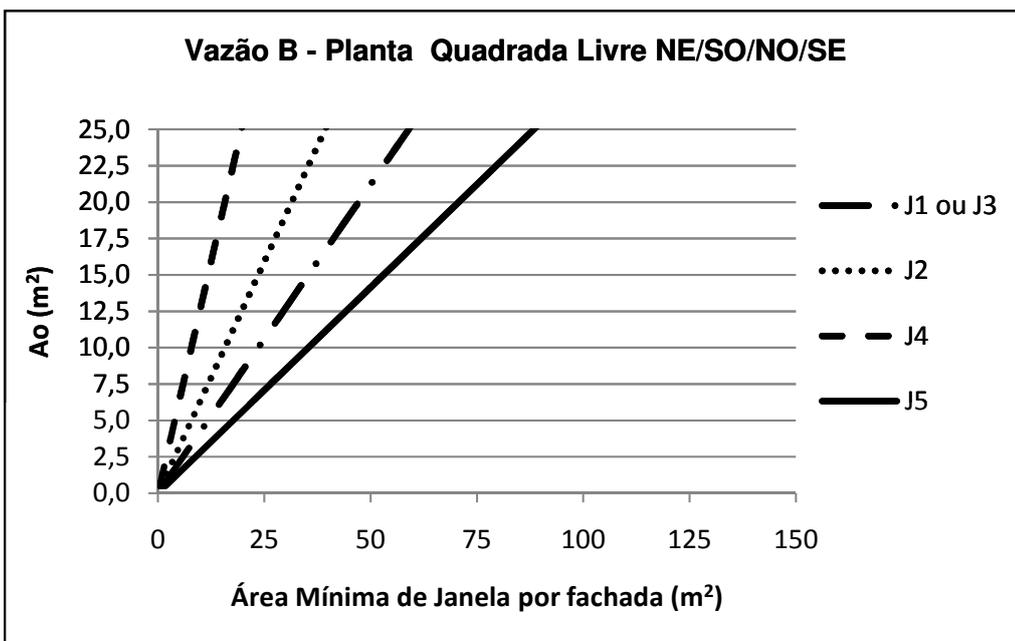


Figura 163. Ao x área mínima de janela para uma fachada dos cenários de edifícios de análise com vazão de ar por efeito de vento (Vazão B), por tipos de janela: planta quadrada livre NE/SO/NO/SE

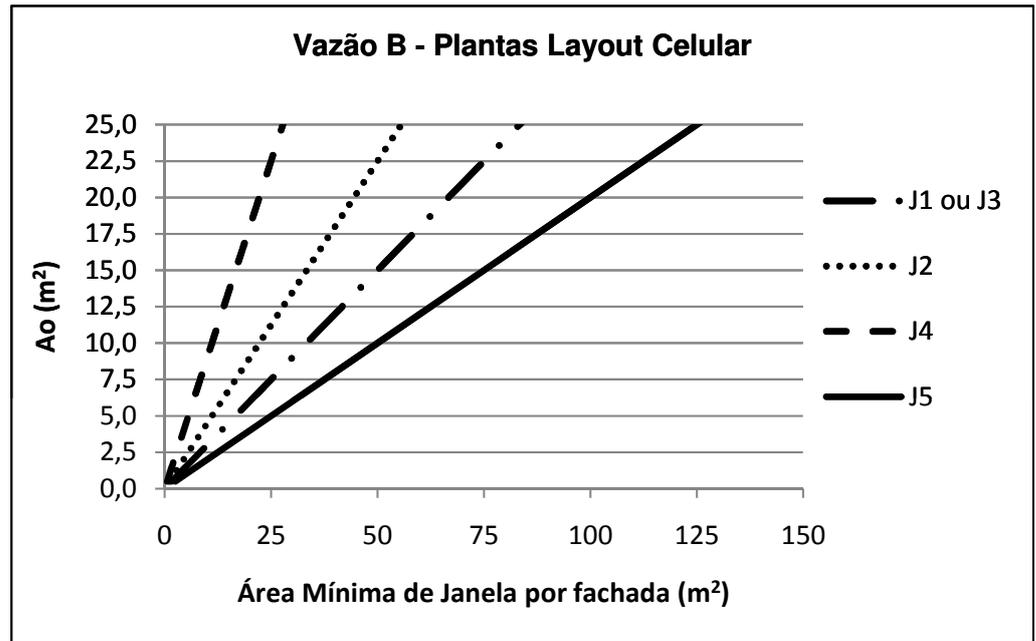
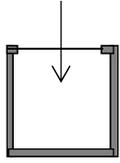


Figura 164. Ao x área mínima de janela para uma fachada dos cenários de edifícios de análise com vazão de ar por efeito de vento (Vazão B), por tipos de janela: planta quadrada e retangular com layout celular

Os valores de  $V$ ,  $\Delta C_p$ ,  $\Delta T$  e  $\Delta T_1$  utilizados para descobrir a área de abertura necessária para cada caso encontram-se na Tabela 29. Nota-se que o  $\Delta T$  é negativo para todos os cenários, ou seja, os ambientes estavam perdendo calor para o exterior na hora de  $Q_{f\text{máx}}$ .

Tabela 29.  $V$ ,  $\sqrt{\Delta C_p}$ ,  $\Delta T$  e  $\Delta T_1$  para os cenários de análise que atingiram o critério (assumindo que o coeficiente de amortecimento “m”, relacionado à inércia térmica do ambiente, permanece 0,6)

Cenários				V m/s	$\sqrt{(\Delta C_p)}$	$\Delta T$	$\Delta T_1$
nº	descrição	zona/sala					
18	PI Ret Celular	sala	S	-	-	-2,53	1,01
22	PI Ret Celular	sala	SO	-	-	-4,71	1,88
26	PI Quad Celular	sala	S	-	-	-2,57	1,03
30	PI Quad Celular	sala	SO	-	-	-3,47	1,39
33	PI Ret Livre	zona	N	3,5	1,2	-0,7	0,28
34		zona	S	3,5	1,2	-0,4	0,15
37	PI Ret Livre	zona	NE	2,9	1,2	-1,3	0,50
38		zona	SO	2,9	1,2	-0,6	0,26
39	PI Ret Livre	zona	NO	2,0	1,2	-0,5	0,18
40		zona	SE	2,0	1,2	-1,5	0,60
41	PI Quad Livre	zona	N	3,5	1,7	-0,5	0,21
42		zona	S	3,5	1,7	-0,3	0,13
43		zona	L	3,5	1,7	-0,8	0,34
44		zona	O	3,5	1,7	-0,6	0,25
45	PI Quad Livre	zona	NE	2,0	1,7	-1,0	0,39
46		zona	SO	2,0	1,7	-0,6	0,24
47		zona	NO	2,0	1,7	-0,6	0,23
48		zona	SE	2,0	1,7	-0,9	0,36
49	PI Ret Celular	sala	N	4,4	-	-4,13	1,65
50	PI Ret Celular	sala	S	4,4	-	-1,69	0,68
54	PI Ret Celular	sala	SO	2,9	-	-4,63	1,85
58	PI Quad Celular	sala	S	4,4	-	-1,73	0,69
62	PI Quad Celular	sala	SO	2,9	-	-4,66	1,86

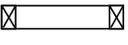
Sabendo-se a área mínima de janela necessária para cada cenário, a(s) abertura(s) de cada fachada pode(m) ser definida(s) e dimensionada(s).

Para localização das janelas nas superfícies transparentes das fachadas, devem ser verificados: a área total de cada fachada do escritório (largura multiplicada pelo pé direito) e o wwr anteriormente definido (Figuras 156 a 160).

É possível conferir se a área mínima da janela escolhida é comportada pela superfície transparente da fachada em questão com a Tabela 30, a qual apresenta a área máxima de janela permitida para uma fachada, por wwr, com distinção entre os edifícios retangular livre, quadrado livre ou as salas dos edifícios com layout celular (já que esses apresentam áreas máximas de fachada distintas).

A Tabela em questão foi elaborada considerando-se a área total de uma fachada, para as três configurações de edifício, e o pé direito dos modelos de referência: 3,75m, de piso a piso. Observa-se que a área máxima de janela aumenta gradualmente conforme a elevação do wwr, até o limite imposto pelo pé direito livre interno: 3m, referente a wwr=80% na Tabela 30. No entanto, a Instrução Técnica do Corpo de Bombeiros da Polícia Militar do Estado de São Paulo (IT) n°9 (2004) e ao Decreto Estadual 46.076/042004 (2004) indicam uma distância mínima de 1,20m entre “vãos” de pavimentos adjacentes (vide item 3.2). Para atender a esta exigência, o wwr máximo permitido para os modelos de edifícios de referência é de 68%.

Tabela 30. Wwr e área máxima de janela contida na superfície transparente da fachada, por configuração de edifício

Área máxima de janela por fachada (m <sup>2</sup> )				
wwr	H <sub>max J</sub> (m)	Planta Retangular Livre	Planta Quadrada Livre	Planta Celular (Sala)
		l <sub>max</sub> = 45 m	l <sub>max</sub> = 30 m	l <sub>max</sub> = 4,5 m
				
100%	3,00	135,0	90,0	13,5
90%	3,00	135,0	90,0	13,5
80%	3,00	135,0	90,0	13,5
70%	2,63	118,1	78,8	11,8
68%	2,55	114,8	76,5	11,5
60%	2,25	101,3	67,5	10,1
50%	1,88	84,4	56,3	8,4
40%	1,50	67,5	45,0	6,8
30%	1,13	50,6	33,8	5,1
20%	0,75	33,8	22,5	3,4
10%	0,38	16,9	11,3	1,7

## 5.2. Exemplos de soluções possíveis de fachadas

Para os vinte e três cenários de edifícios de escritórios em São Paulo que estão em conformidade com o critério de desempenho térmico definido neste trabalho, exemplos de soluções possíveis de fachadas são apresentados a seguir, a partir do procedimento proposto (Figuras 165 a 187).

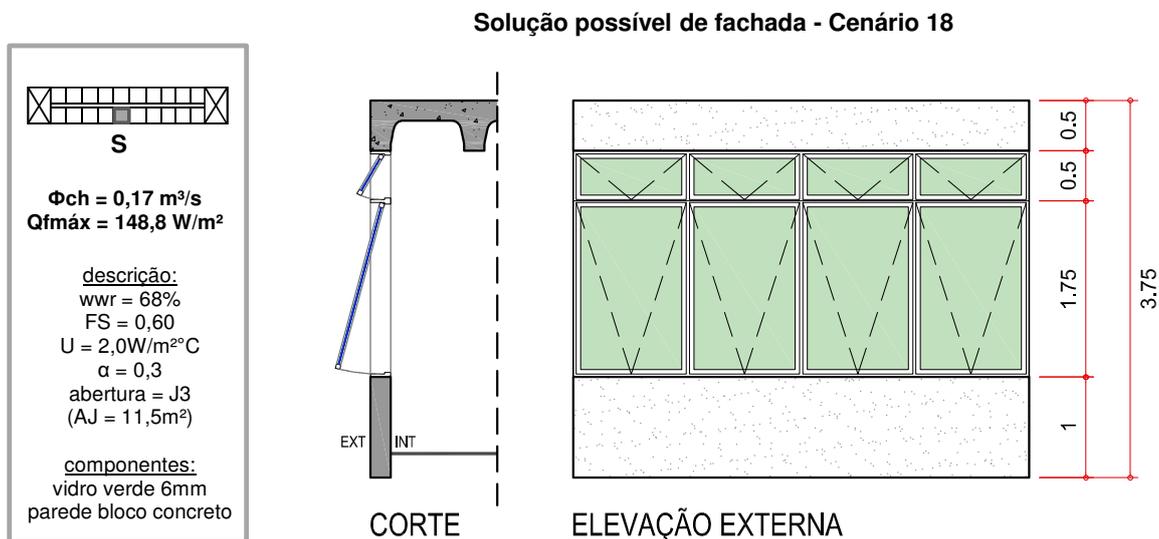


Figura 165. Solução possível de fachada para o Cenário 18 - edifício de planta retangular, layout celular e orientação Sul; vazão de ar por efeito chaminé

Solução possível de fachada - Cenário 22

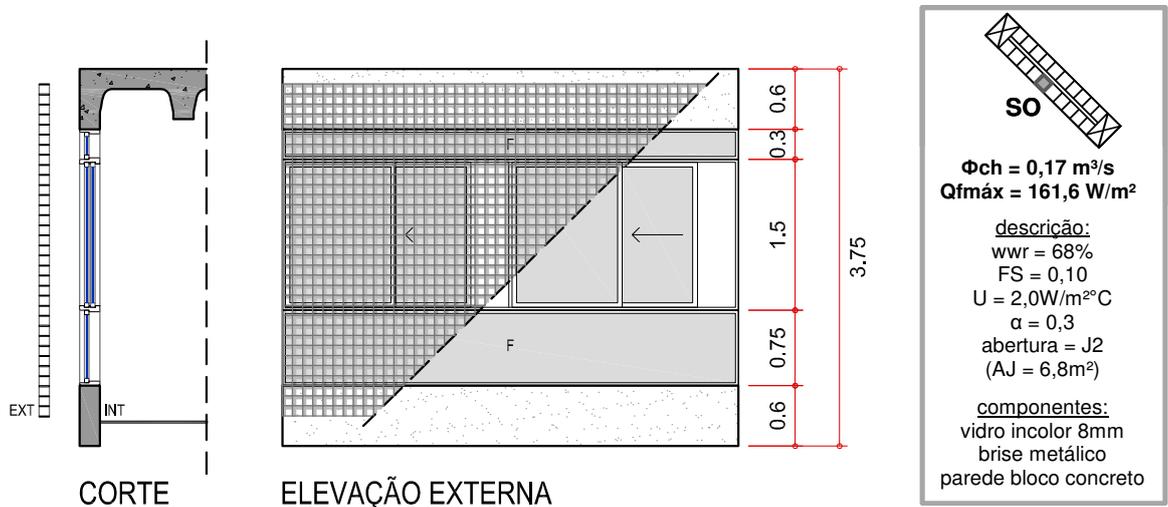


Figura 166. Solução possível de fachada para o Cenário 22 - edifício de planta retangular, layout celular e orientação Sudoeste; vazão de ar por efeito chaminé

Solução possível de fachada - Cenário 26

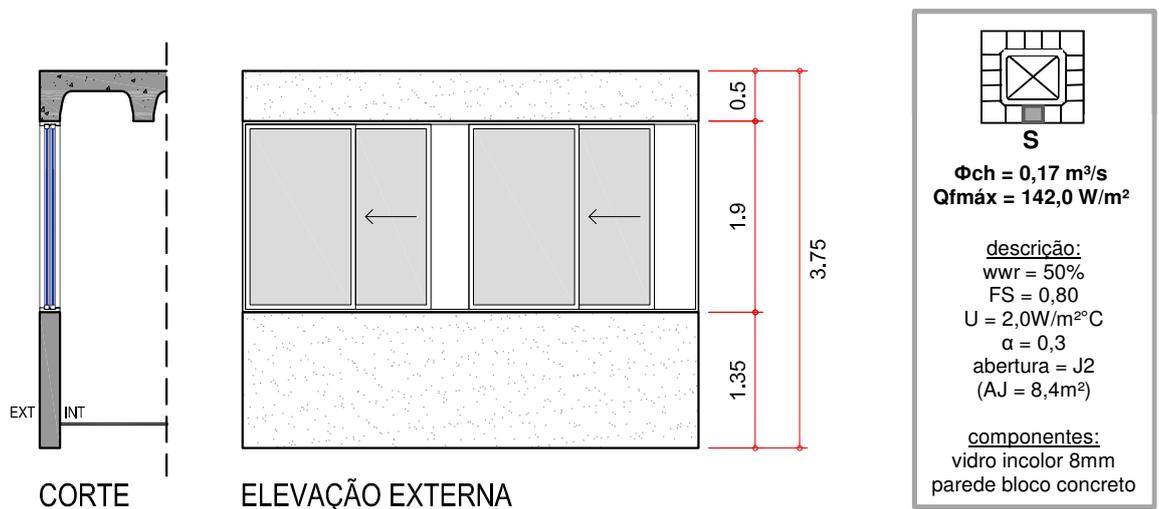


Figura 167. Solução possível de fachada para o Cenário 26 - edifício de planta quadrada, layout celular e orientação Sul; vazão de ar por efeito chaminé

## Solução possível de fachada - Cenário 30

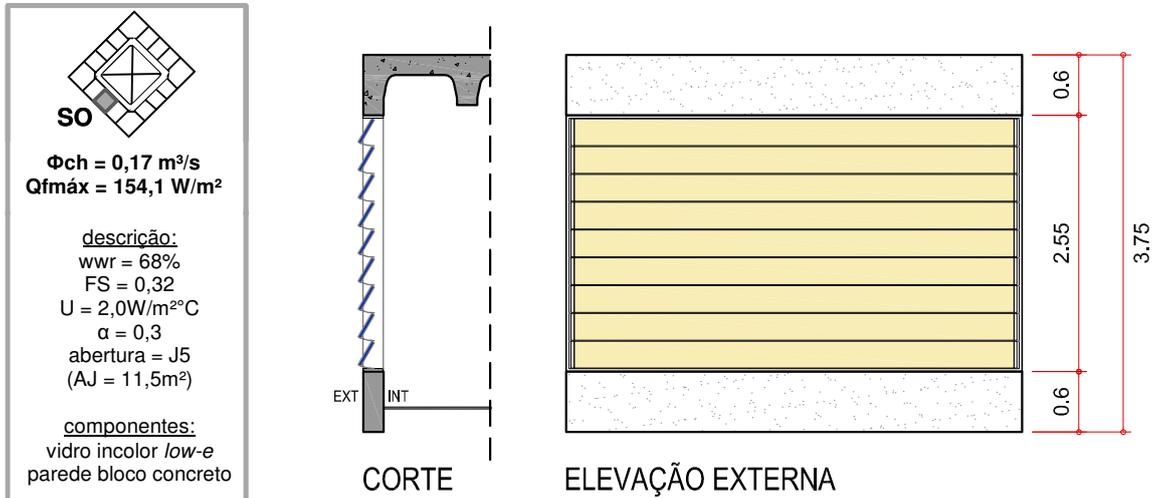


Figura 168. Solução possível de fachada para o Cenário 30 - edifício de planta quadrada, layout celular e orientação Sudoeste; vazão de ar por efeito chaminé

## Solução possível de fachada - Cenário 33

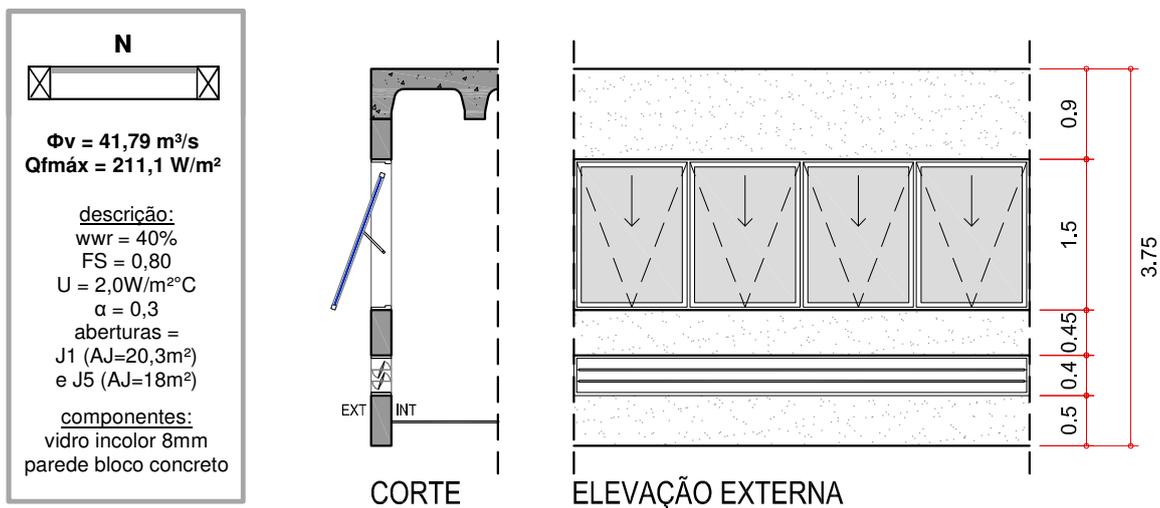


Figura 169. Solução possível de fachada para o Cenário 33 - edifício de planta retangular, layout livre e orientação Norte; vazão de ar por efeito de vento

Solução possível de fachada - Cenário 34

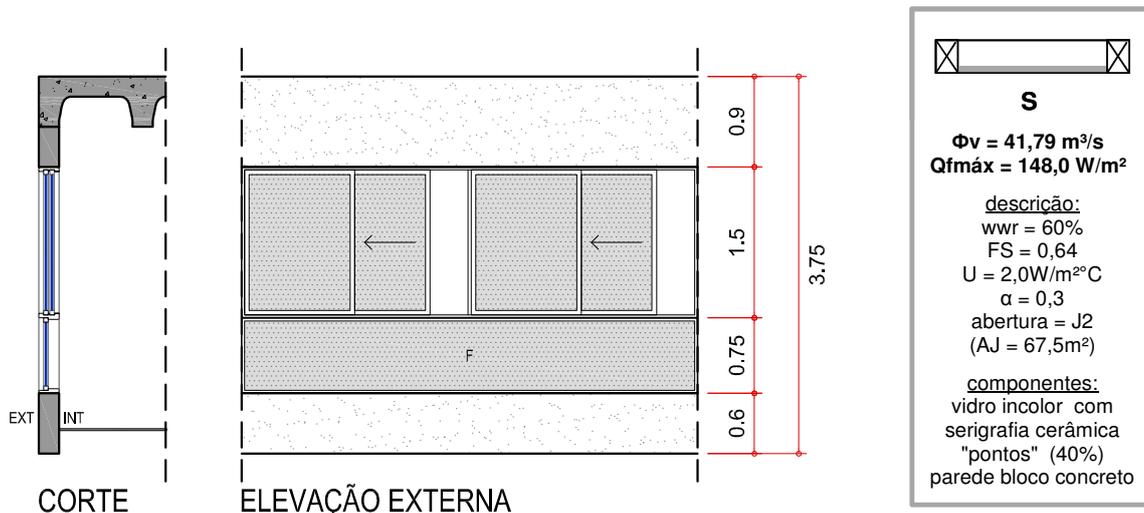


Figura 170. Solução possível de fachada para o Cenário 34 - edifício de planta retangular, layout livre e orientação Sul; vazão de ar por efeito de vento

Solução possível de fachada - Cenário 37

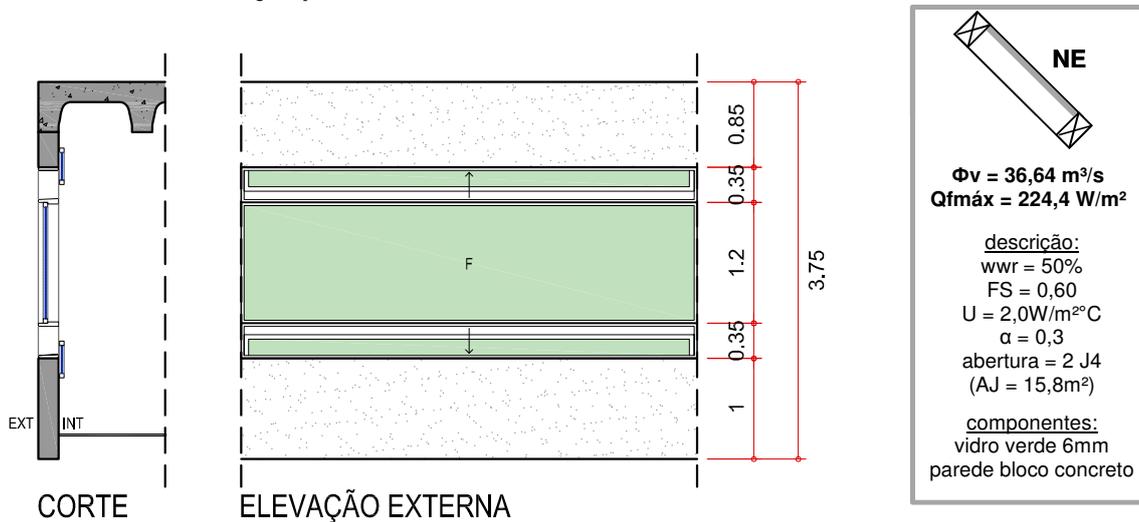


Figura 171. Solução possível de fachada para o Cenário 37 - edifício de planta retangular, layout livre e orientação Nordeste; vazão de ar por efeito de vento

## Solução possível de fachada - Cenário 38

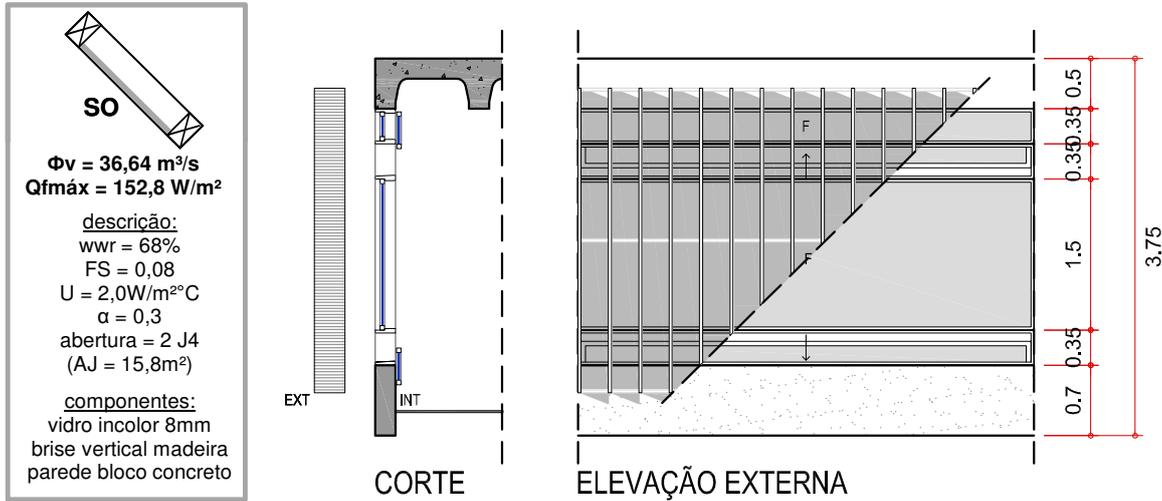


Figura 172. Solução possível de fachada para o Cenário 38 - edifício de planta retangular, layout livre e orientação Sudoeste; vazão de ar por efeito de vento

## Solução possível de fachada - Cenário 39

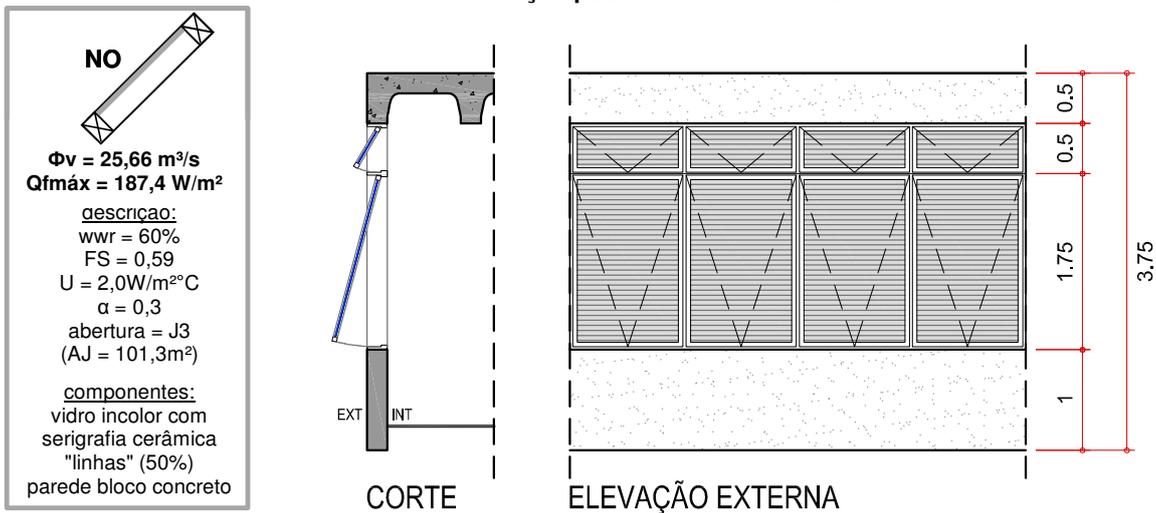


Figura 173. Solução possível de fachada para o Cenário 39 - edifício de planta retangular, layout livre e orientação Noroeste; vazão de ar por efeito de vento

Solução possível de fachada - Cenário 40

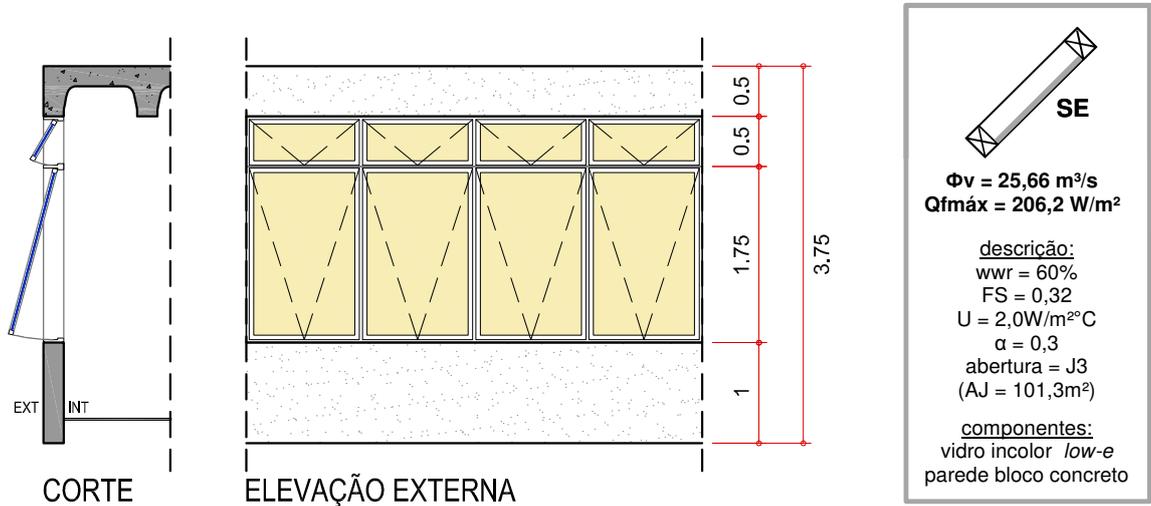


Figura 174. Solução possível de fachada para o Cenário 40 - edifício de planta retangular, layout livre e orientação Sudeste; vazão de ar por efeito de vento

Solução possível de fachada - Cenário 41

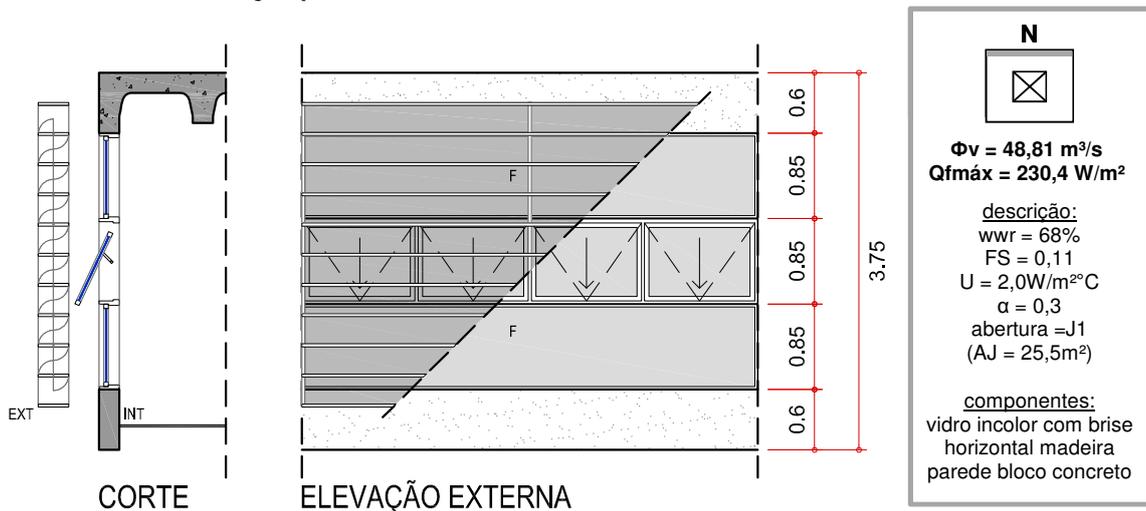


Figura 175. Solução possível de fachada para o Cenário 41 - edifício de planta quadrada, layout livre e orientação Norte; vazão de ar por efeito de vento

## Solução possível de fachada - Cenário 42

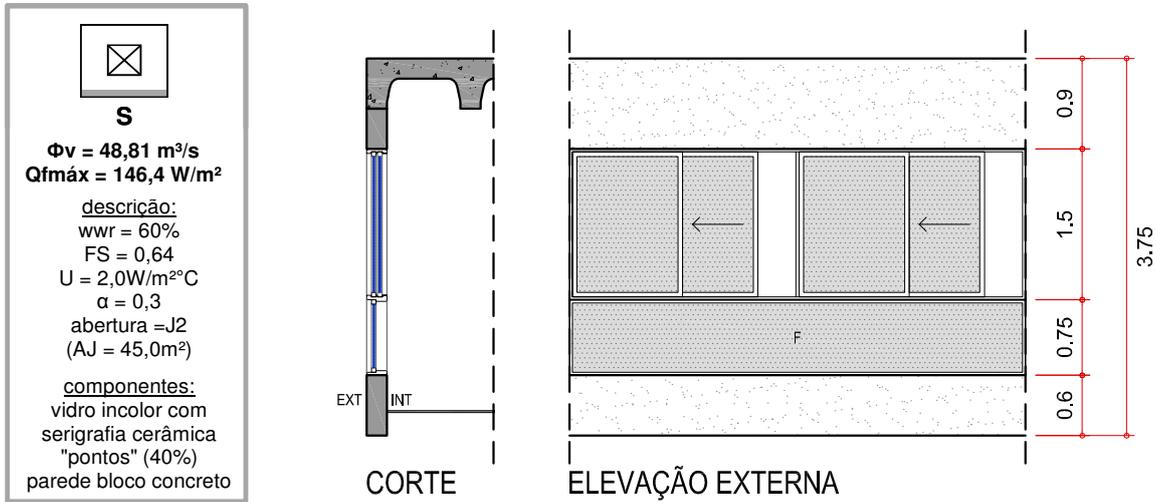


Figura 176. Solução possível de fachada para o Cenário 42 - edifício de planta quadrada, layout livre e orientação Sul; vazão de ar por efeito de vento

## Solução possível de fachada - Cenário 43

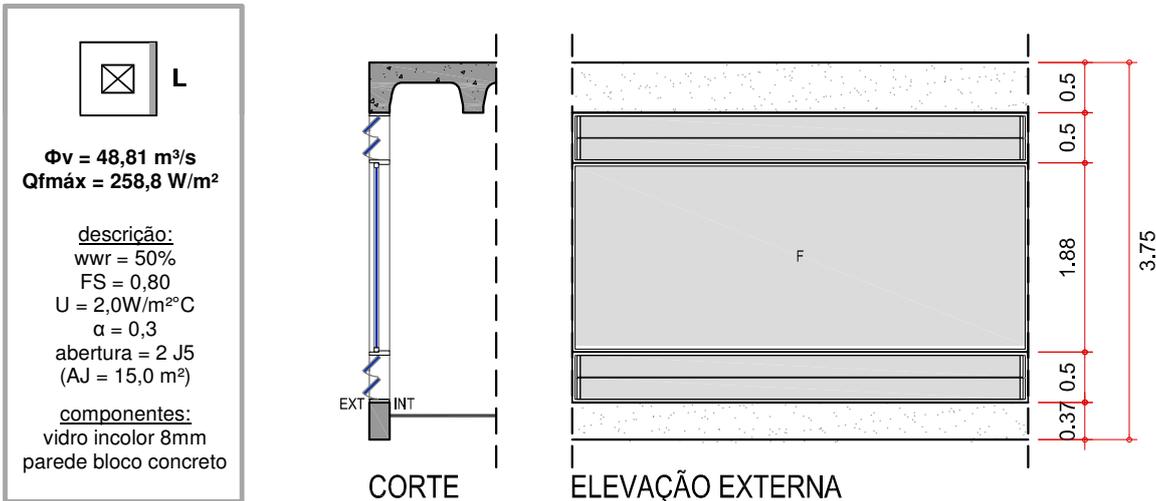


Figura 177. Solução possível de fachada para o Cenário 43 - edifício de planta quadrada, layout livre e orientação Leste; vazão de ar por efeito de vento

Solução possível de fachada - Cenário 44

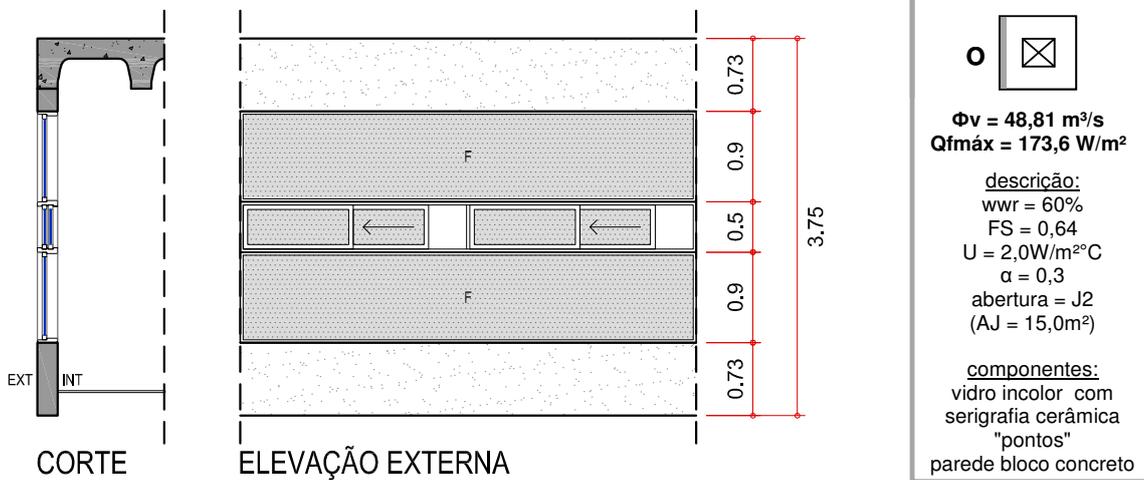


Figura 178. Solução possível de fachada para o Cenário 44 - edifício de planta quadrada, layout livre e orientação Oeste; vazão de ar por efeito de vento

Solução possível de fachada - Cenário 45

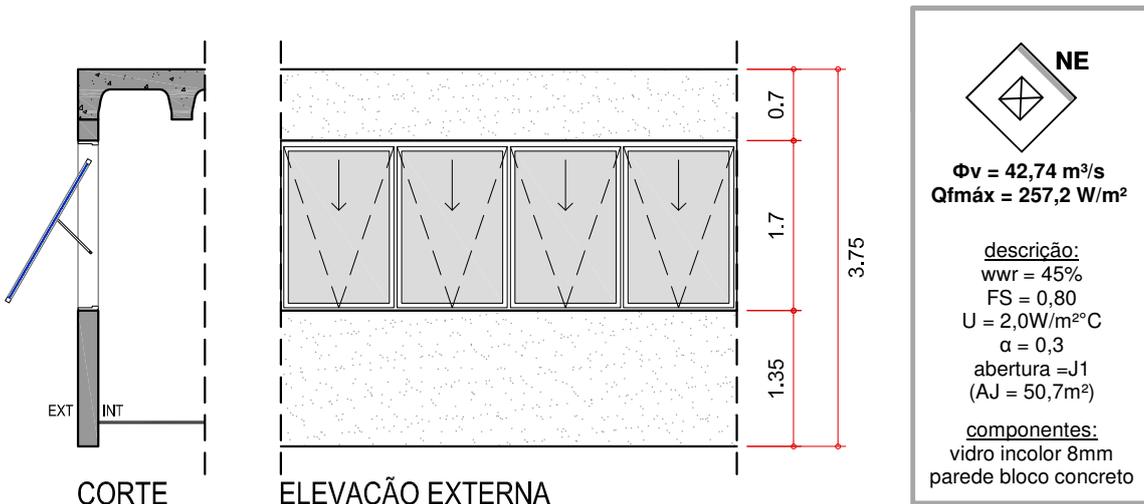


Figura 179. Solução possível de fachada para o Cenário 45 - edifício de planta quadrada, layout livre e orientação Nordeste; vazão de ar por efeito de vento

## Solução possível de fachada - Cenário 46

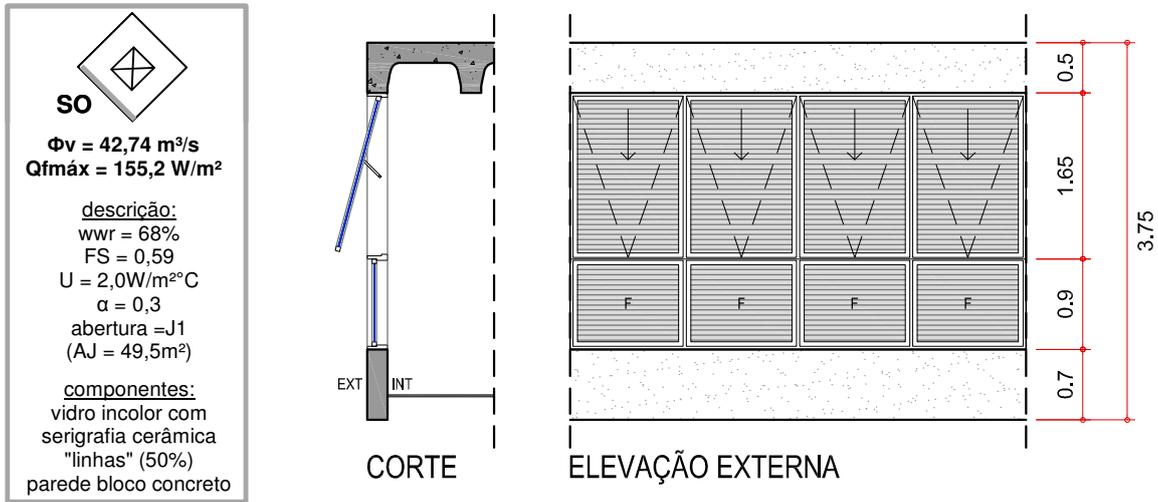


Figura 180. Solução possível de fachada para o Cenário 46 - edifício de planta quadrada, layout livre e orientação Sudoeste; vazão de ar por efeito de vento

## Solução possível de fachada - Cenário 47

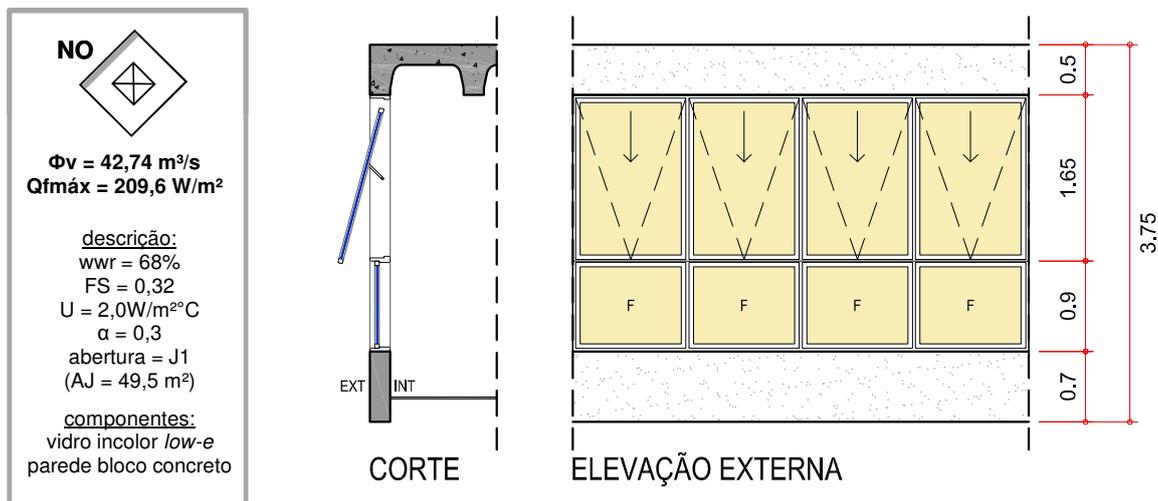


Figura 181. Solução possível de fachada para o Cenário 47 - edifício de planta quadrada, layout livre e orientação Noroeste; vazão de ar por efeito de vento

Solução possível de fachada - Cenário 48

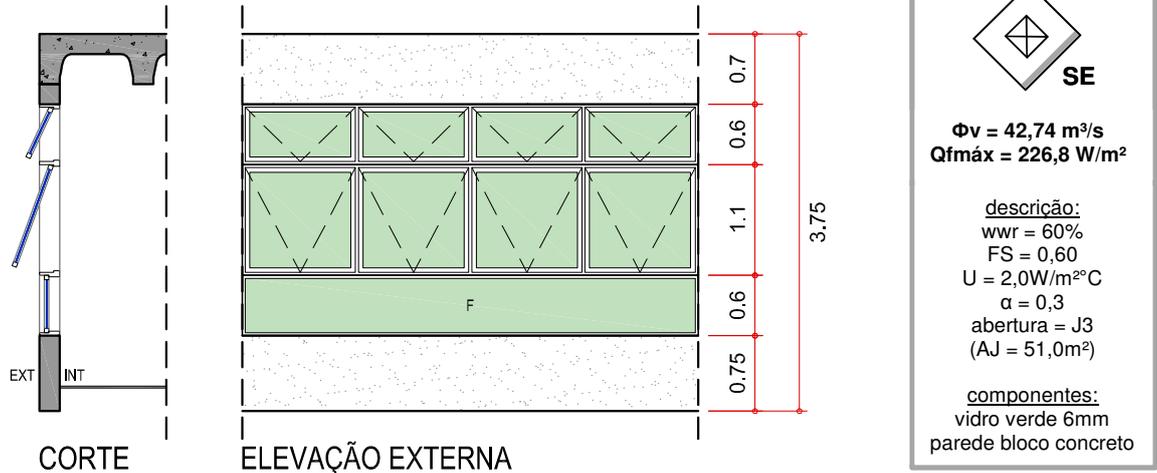


Figura 182. Solução possível de fachada para o Cenário 48 - edifício de planta quadrada, layout livre e orientação Sudeste; vazão de ar por efeito de vento

Solução possível de fachada - Cenário 49

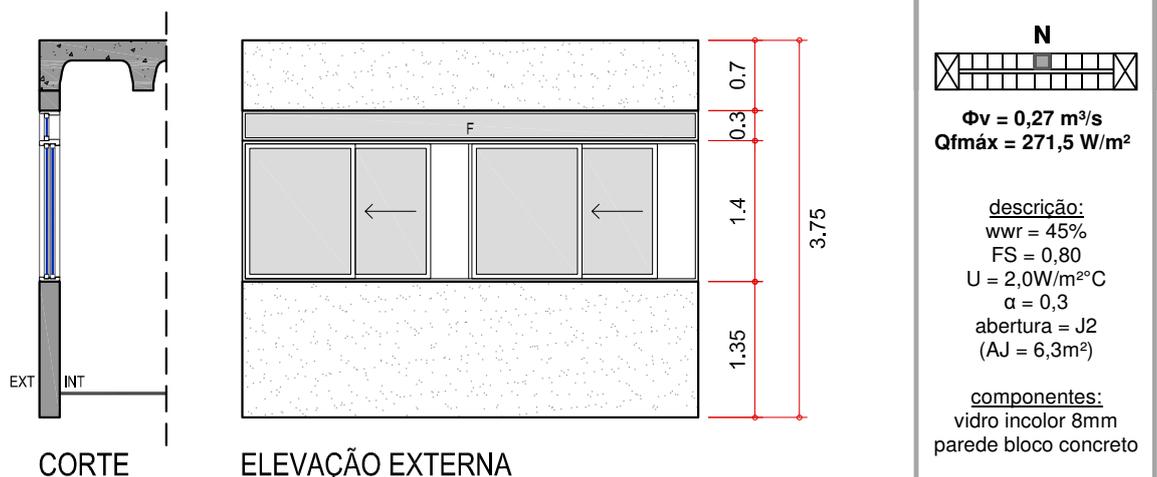


Figura 183. Solução possível de fachada para o Cenário 49 - edifício de planta retangular, layout celular e orientação Norte; vazão de ar por efeito de vento

## Solução possível de fachada - Cenário 50

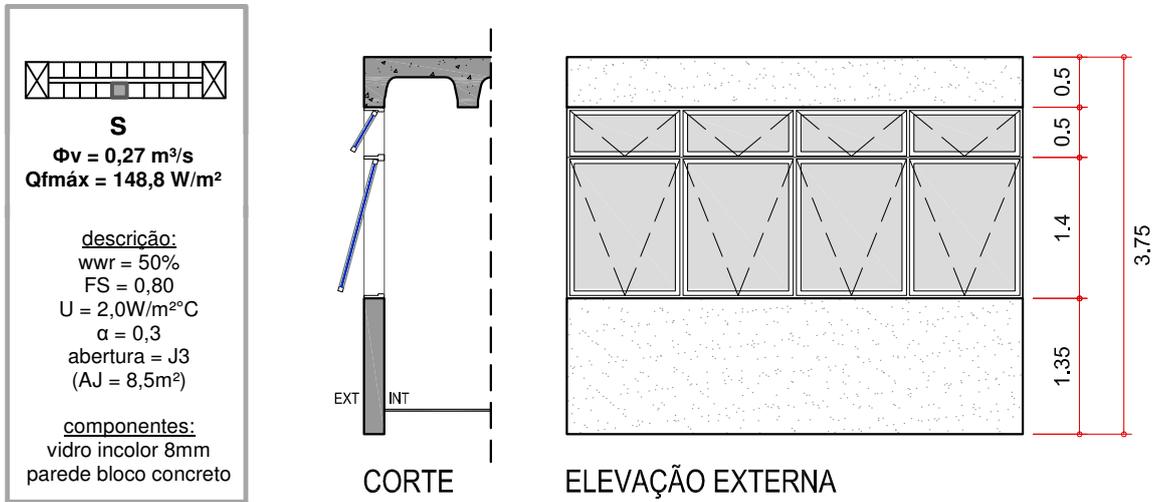


Figura 184. Solução possível de fachada para o Cenário 50 - edifício de planta retangular, layout celular e orientação Sul; vazão de ar por efeito de vento

## Solução possível de fachada - Cenário 54

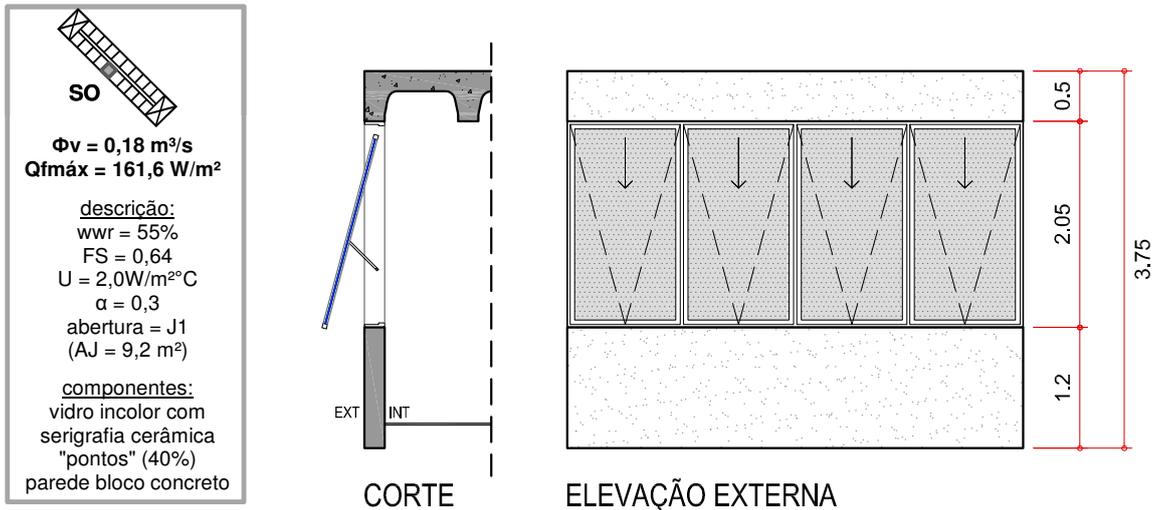


Figura 185. Solução possível de fachada para o Cenário 54 - edifício de planta retangular, layout celular e orientação Sudoeste; vazão de ar por efeito de vento

Solução possível de fachada - Cenário 58

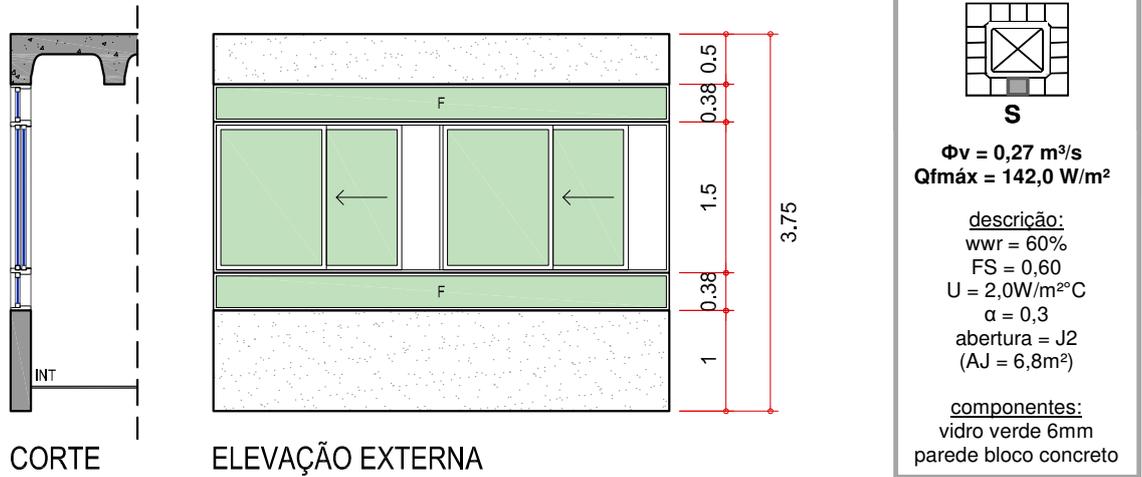


Figura 186. Solução possível de fachada para o Cenário 58 - edifício de planta quadrada, layout celular e orientação Sul; vazão de ar por efeito de vento

Solução possível de fachada - Cenário 62

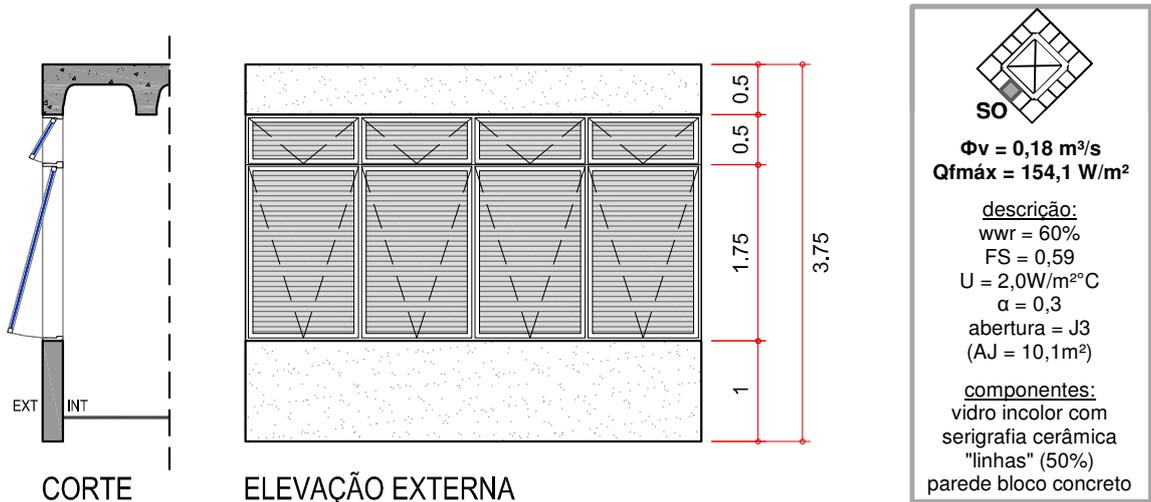


Figura 187. Solução possível de fachada para o Cenário 62 - edifício de planta quadrada, layout celular e orientação Sudoeste; vazão de ar por efeito de vento

### 5.3. Considerações Finais

Foi proposto um procedimento para o projeto de soluções de fachadas para os cenários de edifícios de escritórios com ventilação natural abordados neste trabalho, visando o aprimoramento de seu desempenho térmico, para as condições climáticas de São Paulo. Esse procedimento considera como base os modelos de edifícios de referência desenvolvidos na pesquisa.

Em resumo:

-variáveis a definir: FS, U,  $\alpha$ , wwr, Ao ou Ach e  $H_1$ ;

-variável extraída das simulações computacionais, para o momento de Qfmáx: Rad;

-variáveis calculadas:  $h_e$ , V,  $\Delta C_p$  e  $\Delta T_1$ .

A respeito do procedimento proposto, esclarece-se:

- Diversas soluções de fachadas podem ser dimensionadas para os edifícios de referência a partir das equações indicadas e dos valores de  $\phi$  e Qfmáx. A título de exemplo, foram apresentadas soluções de fachadas possíveis para cada cenário de edifício que atendeu ao critério de desempenho térmico estipulado, considerando-se superfícies opacas que correspondem à relação  $U \times \alpha = 0,6$ .
- Com relação à definição dos componentes da fachada, a parte transparente representa maior influência nos ganhos de calor no ambiente em comparação à parte opaca. Deste modo, a escolha das variáveis FS e wwr é de fundamental importância, e a utilização de elementos de proteção solar externos (os quais possuem FS da ordem de 0,05 a 0,25) aparece como solução eficiente para redução dos ganhos de calor transmitidos pela fachada.
- A respeito do tipo de abertura a ser especificado para a ventilação do ambiente interno, para as situações de ventilação por efeito chaminé, atenção deve ser dada a  $H_1$ , (ou seja, à diferença entre a altura das aberturas de entrada e saída do ar), para maior eficiência da vazão de ar interna.
- Os coeficientes de pressão nas aberturas das fachadas ( $\Delta C_p$ ) podem ser estimados com maior acuidade com simulações computacionais de CFD, de acordo com o tipo de abertura, para cada cenário de edifício.





# Capítulo 6



## Capítulo 6. Conclusões, Considerações Finais e Desenvolvimentos Futuros

### 6.1. Conclusões

#### 6.1.1. Síntese conclusiva dos resultados da avaliação de desempenho térmico realizada para os modelos de referência de edifícios de escritórios com ventilação natural, sob as condições climáticas de São Paulo

A partir da análise comparativa dos resultados da avaliação de desempenho térmico realizada na pesquisa para sessenta e quatro cenários de edifícios de escritórios naturalmente ventilados, para as condições e parâmetros adotados – a dizer:

- dois modelos de edifício de referência com projeto arquitetônico e características de ocupação aprimoradas tendo em vista seu desempenho térmico com ventilação natural para o contexto climático da cidade de São Paulo (conforme definido no capítulo 3);
- teste de quatro configurações de edifícios, divergindo quanto à forma da planta do pavimento tipo (retangular ou quadrada) e quanto ao layout interno (livre ou celular), para oito orientações;
- base de dados climáticos horários anual para a cidade de São Paulo;
- duas condições de ventilação interna, fixas durante todo o período ocupado ao longo do ano (“vazões de referência”): vazão de ar por efeito chaminé (vazão A), com velocidade do vento igual a zero; e vazão de ar por efeito de vento (vazão B), considerando o vento exterior incidente na direção Sul, a velocidade do ar constante igual a 4,5m/s e o edifício totalmente desobstruído, ou seja, sem edifícios vizinhos; em ambas as condições não é considerada a influência do clima urbano em termos de poluição do ar e sonora (conforme o método apresentado no capítulo 4);
- avaliação de um pavimento tipo intermediário, com cota +23m;
- critério de desempenho: porcentagem das horas ocupadas do ano em conformidade com as condições desejáveis de conforto térmico;

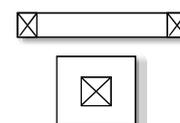
conclui-se que:

- Influência da forma:

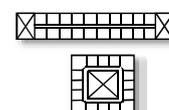
Dentre os edifícios com layout interno livre<sup>133</sup>, os cenários com planta retangular apresentam desempenho cerca de 10% superior em comparação aos cenários com mesma orientação em edifícios de planta quadrada, mesmo que esses comportem uma quantidade maior de janelas nas fachadas (inclusive em duas orientações adicionais) e obtenham vazões de ar superiores às proporcionadas nos primeiros. O principal aspecto de influência da forma desses edifícios em seu desempenho térmico é o número de fachadas expostas, sendo a totalidade (quatro) nos edifícios quadrados livres e duas nos edifícios retangulares. Como consequência, o edifício quadrado livre recebe uma quantidade de carga térmica proveniente da incidência de radiação solar da ordem de 40% superior em comparação ao edifício retangular livre com a mesma área de escritórios.

Para os edifícios com layout celular<sup>134</sup>, nos quais foram consideradas salas com dimensões e características construtivas idênticas entre si e com apenas uma fachada exposta, a forma geral do edifício não constitui fator de significativa

[133] Edifícios de análise com layout interno livre.



[134] Edifícios de análise com layout interno celular.



influência no desempenho térmico dos escritórios com mesma orientação.

- Influência do layout interno:

Para a situação de ventilação por efeito chaminé (com velocidade do vento igual a zero, vazão A) os edifícios com layout celular apresentam melhor desempenho térmico do que os edifícios com planta livre em orientações equivalentes. Nessa condição de ventilação que geralmente representa vazões de ar reduzidas em comparação à situação com vento, o impacto dos ganhos de carga térmica devido à radiação solar mostra-se mais relevante e, portanto, o desempenho obtido por escritórios com apenas uma fachada exposta é superior. Dentre esses se destacam as salas S e SO de ambos os edifícios retangular e quadrado, cujas orientações recebem a menor incidência de radiação solar e, portanto, são as salas que apresentam melhor desempenho térmico.

De modo diverso, na situação com vento externo (vazão B) o desempenho térmico dos edifícios com layout livre é superior ao alcançado para as salas dos edifícios de layout celular, devido à ocorrência de ventilação cruzada na planta livre, com incremento da vazão de ar interna.

- Influência da relação “vazão de ar versus ganhos de carga térmica solar” no desempenho térmico do edifício:

Comparando edifícios de mesma configuração e orientação (e, conseqüentemente, com ganhos solares equivalentes), aqueles com maiores vazões de ar interno apresentam desempenho superior.

Para situações com vento externo ou com ocorrência de maiores vazões de ar interno, a influência da vazão de ar no desempenho térmico dos edifícios de escritórios é superior ao impacto dos ganhos de carga térmica provenientes da radiação solar incidente. Este fato é especialmente relevante para os edifícios com layout livre, nos quais ocorre ventilação cruzada. Entretanto, nos momentos de calma ou em situações com vazão de ar reduzida, a influência dos ganhos de calor solar no desempenho térmico dos edifícios de escritórios aumenta.

Esse fato pôde ser constatado com o aumento do wwr das fachadas de um dos edifícios analisados, o edifício retangular livre orientado a N/S, de 50% para 100%, mantendo-se a vazão de ar constante, nas duas situações de ventilação (Tabela 24). Verificou-se um aumento do ganho solar total no escritório ao longo do ano de 98,8MW para 188,8MW, praticamente proporcional à elevação de 50% de wwr. Para a situação com maior vazão de ar (74,3vol/h), o aumento do wwr da fachada do edifício causou uma redução de aproximadamente 10% na porcentagem anual de horas ocupadas em conforto reduziu (de 95,7% para 85,9%). Em oposição, na situação com vazão de ar reduzida (6,1vol/h), o impacto do aumento do wwr e conseqüentemente dos ganhos de calor solar no ambiente foi maior, ocorrendo uma redução de 50% na porcentagem de conforto anual (de 63,9% para 31,7%).

Dentre os sessenta e quatro cenários avaliados, vinte e três cenários de edifícios de escritórios atingiram o critério estabelecido, estando em conformidade com as condições desejáveis de conforto térmico por no mínimo 80% das horas ocupadas do ano. Dentre os vinte e três casos, quatro são para edifícios com layout celular e vazão de ar por efeito chaminé (salas com orientação S e SO), catorze são para edifícios com layout livre e vazão de ar por efeito de vento (todos os edifícios quadrados e retangulares, com exceção do retangular orientado a L/O) e cinco correspondem a edifícios com layout celular e vazão de ar por efeito de vento (salas S e SO de ambos os edifícios quadrado e retangular, e sala N do edifício retangular).

Como salientado, a avaliação de desempenho realizada considerou duas condições distintas (e extremas) de ventilação para os edifícios. Em uma situação real, a condição

de vento externo apresenta grande variabilidade. Sendo assim, na prática, apenas as salas com orientação S e SO de ambos os edifícios retangular e quadrado poderiam operar durante todo o ano com ventilação natural, por meio do ajuste das aberturas em suas fachadas nas diferentes condições de incidência do vento externo - desse modo, compreendendo os cenários 18, 22, 26, 30, referentes aos momentos de calmaria, e os cenários correspondentes 50, 54, 58 e 62, relativos à condição com vento.

Para os outros quinze cenários de escritórios (os quais correspondem a três dos quatro edifícios retangulares de layout livre, aos dois edifícios quadrados com layout livre e à sala N do edifício retangular celular) as condições desejáveis de conforto térmico foram obtidas exclusivamente com a ventilação natural do edifício apenas nas situações com vento (e vazões do ar interno elevadas). Portanto, para esses seis escritórios, estratégias ativas de condicionamento ambiental complementares serão necessárias nos momentos de calmaria, para incrementar a ventilação interna - como, por exemplo, o uso de ventilação mecânica ou condicionamento do ar. Ressalta-se que, de acordo com os resultados obtidos, as estratégias ativas para os casos em questão seriam necessárias por menos da metade do tempo em que a velocidade do ar externo fosse zero, como ilustram os resultados para os respectivos edifícios na condição de vazão de ar por efeito chaminé (vazão A).

Com base na avaliação de desempenho realizada, pode-se dizer que os escritórios em pavimentos tipo intermediários com orientação L e O são os casos mais críticos para a ventilação natural na cidade de São Paulo, especialmente em edifícios com layout interno celular os quais apresentam desempenhos menos satisfatórios. Por outro lado, os escritórios voltados para S são os mais favoráveis, tanto em edifícios com planta livre (no caso, N/S) quanto para salas de edifícios com layout celular, adicionalmente às salas com orientação SO.

### **6.1.2. Validação da hipótese e satisfação dos objetivos do trabalho**

A confirmação da hipótese, de que a solução de fachada de um edifício de escritórios sob as condições climáticas de São Paulo pode garantir as condições de conforto térmico sem uso do condicionamento artificial nos ambientes de trabalho por no mínimo 80% do ano, efetiva-se nos capítulos quarto e quinto. A hipótese mostrou-se válida para vinte e três dos sessenta e quatro cenários de edifícios analisados, e podem existir outros casos válidos. Adicionalmente, pode tornar-se válida para os quarenta e um cenários que não atingiram o critério de desempenho estipulado promovendo-se alterações no projeto arquitetônico para incremento da vazão de ar e redução dos ganhos de calor.

A satisfação dos objetivos da pesquisa inicia-se no terceiro capítulo, com a elaboração de dois modelos de edifício de escritórios de referência que apresentam desempenho térmico aprimorado e configuração para a ventilação natural; e completa-se no quinto capítulo com a indicação de diversas soluções possíveis de fachada para os edifícios de escritórios com configuração (forma e layout interno) e orientação específicas para otimização do desempenho térmico e maximização do período de ventilação natural, alcançando-se o objetivo principal da pesquisa.

### **6.1.3. Produtos da pesquisa**

Ao longo da pesquisa alcançou-se a totalidade dos resultados pretendidos, fornecendo-se quatro produtos principais, com aplicação prática e teórica.

Produtos com aplicação prática: (I) dois modelos de edifício de escritórios de referência, com características arquitetônicas e parâmetros de ocupação aprimorados para o desempenho térmico e a ventilação natural sob as condições climáticas da cidade de São Paulo; (II) soluções projetuais de fachada para edifícios de escritórios com ventilação natural e desempenho térmico aprimorado.

Produtos com aplicação teórica: (III) método de avaliação de desempenho térmico de edifícios de escritórios com ventilação natural, o qual fornece subsídios para o projeto de soluções de fachadas; (IV) procedimento para o dimensionamento de soluções de fachada para edifícios de escritórios com ventilação natural.

Considerando o desenvolvimento do trabalho, os resultados alcançados e:

- tendo em vista a existência de uma demanda por edifícios com menor consumo energético e que proporcionem condições adequadas de conforto ambiental aos seus ocupantes, em escala global;
- tendo percorrido o contexto do projeto e da construção dos ícones da produção recente de edifícios escritórios nacional;
- tendo investigado exemplos de novos edifícios de escritórios em operação no cenário internacional com ventilação natural do ambiente interno;
- e tendo elencado os métodos de avaliação do desempenho térmico de fachadas e de edifícios de escritórios com ventilação natural, utilizados com maior frequência a partir de 2000;

ênfatisa-se a relevância da pesquisa, e as potenciais contribuições para o projeto de novos edifícios de escritórios na cidade de São Paulo, para o retrofit de edifícios existentes e para o desenvolvimento de novos produtos pela indústria nacional de materiais e componentes - com destaque para caixilhos, dispositivos de proteção solar externos e demais acessórios para as fachadas dos edifícios de escritórios.

Ressalta-se, também, a possibilidade de reaplicação do método de avaliação do desempenho térmico de edifícios de escritórios com ventilação natural e do procedimento para o dimensionamento de soluções projetuais de fachadas para outros contextos climáticos. Nesse caso, haveria necessidade de revisão e adaptação do método de avaliação com base na análise do clima local, abrangendo: detecção das estratégias passivas de condicionamento ambiental possíveis e seu período de recomendação ao longo do ano; adaptação dos modelos de referência de edifícios de escritórios para a realidade local (climática e construtiva, incluindo a disponibilidade de materiais); cálculo das vazões de ar de referência.

## 6.2. Considerações Finais

A solução de fachada para o edifício de escritórios com ventilação natural e desempenho térmico aprimorado na cidade de São Paulo depende da análise e da avaliação do edifício, não bastando apenas considerar o desempenho do elemento “fachada” isolado.

Com relação ao edifício de escritórios, a incorporação da ventilação natural não está vinculada, apenas, à abertura de janelas em um edifício convencional, do tipo “caixa de vidro” selada, projetado para operar com climatização artificial durante todo o período de ocupação (o qual frequentemente apresenta plantas profundas, piso elevado e forro rebaixado compostos por materiais isolantes térmicos, entre outros elementos). A eficiência dessa estratégia de projeto na provisão de condições de conforto térmico aos usuários está condicionada a três aspectos principais: a um modelo de edifício

aprimorado, especificamente para esse fim; ao estabelecimento de novos padrões de uso e ocupação do ambiente de escritórios; e à aceitação de novos padrões de conforto térmico.

O aprimoramento do modelo de edifício deve considerar o projeto arquitetônico (incluindo forma, configuração do pavimento tipo - layout interno, profundidade da planta, pé direito livre -, propriedades dos materiais construtivos) e sua relação com o clima externo no contexto específico de implantação. A esse respeito, destaca-se a necessidade de redução da profundidade da planta, de aumento do pé direito interno, da utilização de materiais com inércia térmica expostos internamente, da adoção de revestimentos externos com cores claras, e do ajuste de todas as variáveis elencadas para as diferentes configurações de edifício, orientações e condições de exposição à radiação solar e aos ventos.

A maior eficiência no uso e na ocupação do edifício de escritórios, nesse caso, está vinculada à redução da densidade de ocupação e à utilização de equipamentos, lâmpadas e luminárias de menor consumo energético, comparativamente aos padrões correntes dos escritórios existentes em São Paulo, reduzindo-se, então, a carga térmica gerada internamente. Como visto, ganhos internos na faixa entre 18W/m<sup>2</sup> e 30W/m<sup>2</sup> são considerados “médios” para padrões europeus, e extremamente desafiadores para o cenário brasileiro. O presente trabalho propõe uma densidade de no mínimo 10m<sup>2</sup> por pessoa, com carga térmica máxima gerada internamente da ordem de 32W/m<sup>2</sup>.

A revisão do conceito de conforto térmico para edifícios de escritórios com ventilação natural e a adoção de novos padrões é calcada na maior tolerância verificada para os usuários dessa tipologia às variações nas condições internas, inclusive com aceitação de temperaturas do ar mais elevadas em comparação aos limites impostos por standards internacionais amplamente adotados como a ISO 7730 (2005) e a ASHRAE 55 (1992) - referentes a edifícios artificialmente condicionados, os quais apresentam condições rigidamente controladas.

Tal fato vem sendo verificado por diversos estudos em edifícios operantes, como constatado por Brager & Dear (1998, 2000, 2002), Fanger & Toftum (2002), Nicol & Humphreys (2002), Rijal et al., (2007) e Wagner et al. (2007), e como reportado por Bittencourt e Cândido (2005), Pfafferott et al. (2007), Moujalled et al. (2008) e Yao et al. (2009), entre outros. Com relação às temperaturas do ar mais elevadas, os estudos de campo realizados por alguns desses autores com usuários de edifícios naturalmente ventilados indicaram que a sensação de desconforto térmico nessas situações era menor do que o previsto pelos cálculos de métodos baseados em PMV e PPD, sendo função das condições externas e, principalmente, devido à possibilidade de controle das condições internas e de intervenção no ambiente, primordialmente por meio do ajuste de janelas. Os estudos em questão direcionam para a adoção de modelos adaptativos de conforto térmico no projeto dos edifícios.

Como exemplo de aplicação de um modelo de conforto adaptativo, a Tabela 31 ilustra os maiores valores de temperatura do ar interna (TBS) aceitos para quatro cenários de edifícios de escritórios avaliados na pesquisa, com método proposto pela ASHRAE 55 (2004). Nota-se a ocorrência de condições de conforto térmico com temperaturas superiores a 28°C em dois desses edifícios. No entanto, observa-se que essa temperatura foi aceita por apenas uma hora no ano em ambos os casos.

Contudo, a combinação do edifício com projeto arquitetônico aprimorado e menor carga térmica de ocupação à aceitação de novos padrões de conforto térmico possibilita otimizar o desempenho térmico e maximizar o período de ventilação natural do edifício de escritórios<sup>135</sup>.

Adicionalmente, reforça-se que o edifício de escritórios com ventilação natural já apresenta um desempenho energético aprimorado por premissa, ao excluir o uso de sistemas prediais para condicionamento ambiental. No caso de uma estratégia de condicionamento ambiental em modo-misto, existe um potencial de melhora no

[135] Os estudos desenvolvidos por Rijal et al. (2007) evidenciam que projetos aprimorados de edifícios levam a uma alteração do comportamento dos usuários de adaptação das condições internas, com a redução na quantidade de vezes em que esses operam as janelas para reduzir o desconforto. Como consequência, os autores afirmam que a sensação de conforto térmico dos ocupantes é aprimorada.

Tabela 31. Máxima temperatura do ar interna aceita para quatro cenários de edifícios de escritórios da pesquisa com base no modelo adaptativo de conforto da norma ASHRAE 55 (2004)

Máxima temperatura do ar interna ocorrida para horas em conforto			TBS ext (°C)	TBS int máx (°C)	To (°C)	tmm (°C)	dia	hora	Comentário sobre a TBS int máx
vazão B	n.34	PI Ret Livre NS zona S	28,7	<b>28,8</b>	28,5	22,8	07/mar	15	Aconteceu em 3 horas ocupadas, apenas 1 hora em conforto; 28,7°C aconteceu em 5 horas ocupadas, todas em desconforto por calor
vazão B	n.35	PI Ret Livre LO zona L	26 25,7	<b>27,6</b>	22,1 26,8	18,4 18,7	19/set	17 14	Aconteceu em 31 horas ocupadas no ano, apenas 2 horas em conforto
vazão B	n.50	PI Ret Celular NS sala S	28,3	<b>29,1</b>	28	22,2	23/abr	15	Aconteceu em 13 horas ocupadas, apenas 1 hora em conforto
vazão A	n.13	PI Quad Livre NE/SO/NO/SE zona NE	24,7	<b>27,6</b>	28,3	21,9	30/abr	17	Aconteceu em 36 horas ocupadas, apenas 1 hora em conforto

[136] Dados obtidos após a crise mundial de 2008 apontam a retomada do aquecimento do mercado imobiliário local voltado aos edifícios de escritórios, com demandas superiores às reportadas no Capítulo 1 da tese. Tal situação é decorrente da escolha da cidade do Rio de Janeiro para sediar a copa do mundo em 2014 e os Jogos Olímpicos em 2016.

desempenho energético do edifício com a redução do uso de sistemas ativos; no entanto, esse fato vai depender das condições específicas de projeto e de operação do edifício, o que deve ser analisado e estimado para cada situação.

Nesse contexto, enfatiza-se que a aplicação de um selo ou certificação de green building, ou ainda, o atendimento aos requisitos para obtenção de um selo ou certificação de green building a edifícios de escritórios na cidade de São Paulo não garante, por si só, que o edifício alcance seu potencial máximo em termos de desempenho térmico e energético. Esse fato é especialmente relevante tendo em vista a tendência em adotar, para os edifícios brasileiros, selos internacionais cujos critérios e pontuações foram definidos com base em outras realidades climáticas, urbanísticas, arquitetônicas, sociais e econômicas.

Acredita-se que, para viabilizar o projeto e a construção de edifícios de escritórios locais mais eficientes energeticamente e confortáveis para seus ocupantes, existe a necessidade de implementação de leis e regulamentações nacionais para promover o direcionamento dos profissionais do setor da construção civil e dos agentes do mercado imobiliário, auxiliando a regular a produção de edifícios, e para impulsionar o desenvolvimento de novos produtos pela indústria de materiais e componentes local.

A existência de uma legislação efetiva abordando o desempenho térmico e energético dos edifícios de escritórios se faz mais urgente se consideradas a atual crise energética mundial e a demanda local por edifícios de escritórios “de alto padrão”, sendo a última verificada principalmente nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro<sup>136</sup>. Parte do escopo das leis e regulamentações almejadas, a definição de critérios de desempenho pertinentes para os edifícios de escritórios locais deve conduzir ao projeto de sistemas de fachadas mais eficientes, e pode incentivar a incorporação da ventilação natural nos espaços de trabalho.

Adicionalmente, faz-se necessária a conscientização dos usuários a respeito das

questões envolvidas no projeto, na construção e na operação das edificações, notadamente para aquelas com atividade de escritórios e ventilação natural.

Com relação à predição da ventilação nos edifícios, pode-se dizer que a estimativa acurada das condições de ventilação natural no interior das edificações não é uma tarefa trivial. Nesse processo, o vento externo sofre alterações constantes em sua intensidade e direção de incidência, o que aparece aliado a diferentes configurações de edifícios (formais e funcionais) com diversos tipos, dimensionamento e posicionamento de aberturas para ventilação. A variabilidade de situações possíveis conforma diferentes cenários a serem avaliados.

Apesar do desenvolvimento de importantes pesquisas e estudos sobre a predição das condições de ventilação natural em edifícios nos últimos 50 anos, especialmente com relação à vazão e à velocidade do ar interno (Santamouris, 1998), verificou-se a inexistência de métodos abrangendo a gama de situações possíveis, e a ausência de normas para o estabelecimento de critérios para diversas situações. Como exemplo, cita-se a norma brasileira NBR 16401 (2008), a qual estipula valores mínimos de vazão de ar em ambientes artificialmente climatizados para questões de salubridade; entretanto, não existe uma norma nacional que estabeleça níveis mínimos de vazão de ar interna para edifícios naturalmente ventilados, seja para condições de salubridade ou, quiçá, para o conforto térmico dos usuários.

A partir da literatura disponível sobre o tema, verifica-se, com frequência, a adoção de generalizações e a simplificação dos casos de análise, e ressalta-se a importância da escolha do método de cálculo a ser utilizado para cada caso de edifício e condição de ventilação considerados, tendo em vista a obtenção de resultados divergentes com a utilização de diferentes métodos de estimativa da ventilação natural em edificações<sup>137</sup>. Esse fato é especialmente relevante considerando-se o impacto da vazão de ar no desempenho térmico dos edifícios de escritórios naturalmente ventilados, como constatado com os resultados da avaliação de sessenta e quatro cenários de edifícios realizada na presente pesquisa. Reconhece-se as condicionantes específicas da avaliação realizada e as limitações do método de avaliação proposto, com generalizações para a premissa de ventilação natural do edifício. Ainda assim acredita-se que os resultados obtidos são indicativos da magnitude da influência da vazão de ar no desempenho térmico de edifícios de escritórios naturalmente ventilados na cidade de São Paulo.

Juntamente à estimativa da vazão de ar interna, cabe apontar a validade da realização de estudos preditivos das velocidades do ar no ambiente para o projeto de edifícios de escritórios com ventilação natural. Sabe-se que a velocidade do ar no interior dessas edificações não é uniforme; depende da relação entre a condição de incidência do vento externo e a configuração do edifício (formal e de layout interno), resultando em diferentes cominhos percorridos pelo ar no interior dos ambientes. Santamouris (1998) observa que a ocorrência de áreas com velocidade reduzida do ar e áreas submetidas a rajadas de vento - as quais podem causar inconveniências práticas, como levantar papéis, além de desconforto térmico aos ocupantes (Bittencourt & Cândido, 2005) – são claramente visualizadas em estudos desenvolvidos com modelos físicos em túnel de vento.

Considerando-se o conjunto de informações colocadas, retoma-se a afirmação de que o projeto de uma solução adequada de fachada para o edifício de escritórios naturalmente ventilado e termicamente aprimorado parte da avaliação do desempenho térmico e das condições de ventilação do edifício, sob influência da fachada.

Partindo-se de um modelo de edifício de escritórios com projeto arquitetônico e características de ocupação aprimorados, e tendo-se considerado as condições possíveis de ventilação natural do edifício em relação ao clima externo e ao entorno construído, uma solução de fachada adequada para os fins estabelecidos neste trabalho deve atender a dois aspectos principais: controlar os ganhos de calor devido

[137] Tal fato pode ser constatado com a utilização de dois métodos de cálculos distintos para estimar a vazão de ar por efeito chaminé em um mesmo ambiente de escritórios, como parte da avaliação de desempenho térmico de edifícios naturalmente ventilados realizada na presente pesquisa, para três situações específicas. Uma variação da ordem de cinco a sete vezes foi encontrada para os resultados obtidos com os diferentes métodos, dependendo da configuração do edifício analisado.

[138] Observar que a influência do tipo do brise na ventilação é um assunto que deve ser estudado. Destaca-se a escassez de referências bibliográficas que abordam esse tema.

à radiação solar (limite máximo) e permitir níveis adequados de vazão de ar no interior do edifício (limite mínimo).

Desse modo, enfatiza-se que as soluções possíveis de fachadas para um determinado edifício de escritórios com ventilação natural não são soluções replicáveis, tanto com relação a outros edifícios, quanto para ambientes de um mesmo edifício que apresentem diferentes usos e/ou configurações e/ou orientações.

No projeto das soluções possíveis de fachada é imperativo que se considere as condições específicas de cada ambiente – formais, dimensionais, construtivas, ocupacionais e de exposição solar e aos ventos –, para a definição dos componentes transparentes e opacos e da proporção entre eles, e para escolha do tipo, dimensionamento e posicionamento das aberturas.

Nesta pesquisa foram exemplificadas soluções possíveis de fachada para vinte e três cenários de edifícios que atenderam ao critério de desempenho térmico estipulado. As soluções apresentadas são compostas por alguns dos materiais disponíveis no mercado, incluindo cinco tipos de abertura e alguns tipos de elementos externos de proteção solar, mas fazem parte de uma gama de possibilidades em função da combinação entre os materiais e componentes construtivos, os tipos de abertura e demais dispositivos.

Assim, o projeto de diferentes soluções de fachadas vai depender da disponibilidade de materiais e componentes pela indústria local (tipos de vidros, sistemas de caixilhos, painéis de vedação, materiais de revestimento, dispositivos de proteção solar, etc.) e da criatividade dos projetistas na experimentação de novas combinações.

Abrangendo a variabilidade de situações possíveis a que estão submetidos os edifícios naturalmente ventilados em suas diferentes configurações, o desempenho térmico do edifício e a eficiência da estratégia de ventilação natural tendem a ser melhores quanto mais flexível for a solução de fachada empregada, possibilitando a adaptação às variações nas condições internas (de uso e ocupação, que, por sua vez, vão refletir nas condições ambientais) e nas condições climáticas externas (temperatura e umidade do ar, intensidade e direção de incidência do vento, radiação solar, chuva), num ciclo diário e sazonal.

Como consequência, a relevância da possibilidade de controle e ajuste das aberturas e demais dispositivos associados a elas é novamente ressaltada, caracterizando um aspecto de influência tanto no conforto térmico dos ocupantes, quanto no desempenho térmico e no potencial de ventilação natural do edifício.

Acrescenta-se ainda, que, na prática brasileira da construção de edifícios, sabe-se que a consideração da adequação ao desempenho térmico e à ventilação natural, no momento da escolha da solução de fachada, acontecerá juntamente ao atendimento de outras questões de ordem estética e de custos financeiros (tanto de construção quanto de operação e manutenção), fatores que, com frequência, acabam sendo dominantes para muitos projetos arquitetônicos.

Salienta-se, portanto, o papel fundamental da indústria de materiais e componentes no desenvolvimento de sistemas de caixilhos que possibilitem o ajuste dos vãos e/ou a alternância entre modos de abertura.

Tendo em vista que os elementos de proteção solar externos às superfícies transparentes das fachadas são eficientes alternativas para a redução do ganho de calor nos ambientes, especialmente se contemplada a tipologia de edifício de escritórios (pela alta geração de carga térmica interna) sob o clima de São Paulo (com elevada disponibilidade de radiação solar e com a ocorrência de temperaturas elevadas em alguns dias do ano), esclarece-se que o dimensionamento de brises como parte do projeto da fachada deve considerar, adicionalmente, a possível interferência desses elementos na ventilação do ambiente, atentando para que a solução de fachada

resultante garanta uma vazão de ar interna adequada<sup>138</sup>.

Finalmente, considerando que este trabalho abordou os edifícios de escritórios naturalmente ventilados na cidade de São Paulo e suas fachadas, sob a óptica do desempenho térmico e do conforto térmico, a presente pesquisa insere-se em um contexto mais amplo, o qual compreende aspectos das edificações vinculadas às questões de desempenho luminoso, desempenho acústico, consumo de energia, gerenciamento de materiais e resíduos, impacto no entorno construído e no meio ambiente, entre outras não menos importantes de viés social e econômico, em direção à produção de uma arquitetura mais sustentável – ou, como define Mülfarth (2003), uma arquitetura de baixo impacto humano e ambiental:

*É uma forma de promover a busca pela igualdade social, valorização dos aspectos culturais, maior eficiência econômica e menor impacto ambiental nas soluções adotadas nas fases de projeto, construção, utilização, reutilização e reciclagem da edificação, visando à distribuição equitativa da matéria-prima e garantindo a competitividade do homem e das cidades. (Mülfarth, 2003, p.8)*

Nesse contexto, salienta-se que a incorporação da ventilação natural nos edifícios de escritórios deve ser considerada nas etapas iniciais do projeto arquitetônico, verificando-se os requisitos específicos de cada edifício e equalizando potenciais conflitos com alguns dos aspectos apontados, como por exemplo, a entrada de ruído externo, o acesso de luz natural em excesso, a entrada de insetos e de material particulado, além de questões de privacidade e segurança, entre outros.

### 6.3. Desenvolvimentos futuros

No processo de desenvolvimento da pesquisa diversas questões e aspectos adicionais e/ou complementares foram levantados. Com base no trabalho realizado, sugestões de prosseguimento da pesquisa e desenvolvimento de estudos futuros no tema são realizadas:

- Seguindo o método de avaliação de desempenho de edifícios de escritórios com ventilação natural proposto na pesquisa de doutorado, sugere-se um estudo em duas partes.

Parte A - Avaliação do desempenho térmico das salas de esquina nos edifícios de escritórios com planta quadrada e layout celular e proposição de soluções de fachadas. Diferentemente das salas “centrais” avaliadas que possuem apenas uma fachada exposta, as salas de esquina possibilitam a colocação de janelas em duas fachadas adjacentes e, em consequência, permitem a ventilação cruzada no ambiente.

Parte B - Avaliação comparativa do desempenho térmico de diferentes pavimentos em cada configuração de edifício.

- Realização de simulações computacionais dos modelos de edifício de escritórios de referência com programas de análise da dinâmica de fluidos (CFD) e de análise térmica num processo de “retroalimentação”, no qual os resultados da simulação de CFD geram insumos para a simulação anual de desempenho térmico. Da análise de CFD são obtidos dados de vazão de ar interna de modo mais acurado, além de coeficientes de pressão nas aberturas (Cps), velocidade e distribuição do ar nos ambientes, para cada cenário. Esses resultados da análise de CFD são utilizados como dado de entrada nas simulações térmicas para avaliação do desempenho térmico do edifício sob tais condições de ventilação. Adicionalmente aos sessenta e quatro cenários definidos neste trabalho, podem ser testadas outras tipologias de janelas além da maxim-ar, e diferentes posicionamentos das aberturas de um mesmo tipo ou de tipos diversos, simultaneamente, para análise de seu impacto na

ventilação interna nas diversas configurações de edifício e orientações.

- Avaliação da influência de elementos de proteção solar externos às aberturas na ventilação interna do edifício de escritórios, em termos de velocidade, vazão e distribuição do ar, com simulação computacional de CFD. Análise da combinação de diferentes tipos de janela (maxim-ar, basculante, 'de correr', entre outras) com elementos de proteção distintos (venezianas horizontais e verticais, marquises, etc), de acordo com as demandas de proteção solar em cada orientação do edifício. Estipular um "fator de obstrução à ventilação natural" para cada cenário resultante da combinação entre configuração de edifício, orientação, caracterização de abertura e tipo de dispositivo de proteção solar. Posteriormente, avaliação do desempenho térmico anual resultante nos edifícios com o uso dos respectivos dispositivos de proteção solar, com simulação computacional anual de desempenho térmico.
- Avaliação das condições de conforto térmico na áreas de trabalho junto à fachadas (ou seja, na periferia da planta do pavimento tipo) dos 64 cenários de edifício de escritórios, devido à incidência de radiação solar direta nos ocupantes localizados nesta porção do ambiente (considerando, por exemplo, a área relativa a uma faixa de 2m de profundidade a partir da fachada). A detecção de uma condição de desconforto em algum cenário será indicativa da necessidade de sombreamento das superfícies transparentes da fachada, mesmo que o respectivo cenário atenda ao critério de desempenho térmico geral (isto é, que apresente um mínimo de 80% das horas ocupadas do ano em conforto).
- Análise da influência da ventilação no período não ocupado ou ventilação noturna no desempenho térmico do ambiente interno: teste de diferentes cronogramas de abertura de janela, referente a períodos de ventilação num ciclo diário e sazonal. Avaliação do desempenho térmico anual do ambiente interno e respectivas vazões de ar resultantes em cada condição de edifício e cronograma de operação de diferentes tipos de janela.
- Análise do aprimoramento da relação vazão de ar possível versus ganho de calor pela fachada, para os cenários de estudo que não atingiram o critério de desempenho estipulado, no intuito de otimizar seu desempenho e atingir o mínimo de 80% das horas ocupadas em conforto. Teste de diferentes tipos de abertura e uso de elementos de proteção solar externos às fachadas.
- Para os casos nos quais ainda não for possível a incorporação de ventilação natural por no mínimo 80% do período de ocupação, analisar a implementação de uma estratégia de condicionamento ambiental em modo-misto, com o teste de cronogramas e estratégias de controle das aberturas e do funcionamento dos sistemas de condicionamento ambiental, equalizando a interface entre os modos de operação ativo e passivo do edifício, especificamente para cada cenário.
- Avaliação do desempenho térmico e da eficiência da ventilação natural em modelos de edifício do tipo "espaços conectados" (Etheridge & Ford, 2008), com átrio interno, e diferentes soluções de fachada: voltadas para o átrio e para o exterior. Método: realização de simulações computacionais dos modelos de edifício de escritórios com programas de CFD e de análise térmica anual, como anteriormente mencionado.
- Avaliar o desempenho térmico e a eficiência da ventilação natural em modelos de edifício com fachadas duplas ventiladas, com mesmo método indicado no item anterior. Teste de diferentes tipologias quanto à configuração da cavidade conformada entre as peles de vidro da fachada: adjacente a apenas uma sala, conectando diversos pavimentos ou limitada por pavimento do edifício; teste da combinação de fachadas simples e fachadas duplas ventiladas em um mesmo edifício, para os cenários de edifícios com layout interno livre.





# Capítulo 7



## Capítulo 7. Referências Bibliográficas

1. ABBATI, C. Espaços Inteligentes. **Exame PME**. n.85, julho/ agosto de 2008.
2. ALUCCI, M. P. **Conforto térmico, conforto luminoso e conservação de energia elétrica** – procedimentos para desenvolvimento e avaliação de projeto de edificações. 1993. Tese (Doutorado)—Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1993.
3. \_\_\_\_\_. **Dimensionamento de aberturas para otimização da iluminação natural e otimização do consumo de energia elétrica**. São Paulo: Editora da UNIB, 2002.
4. \_\_\_\_\_. Fachadas transparentes: do conforto ao consumo de energia elétrica. **Téchne**, 1999.
5. \_\_\_\_\_. **Software “Climaticus”**. São Paulo: Fauusp, 2005. Disponível em: <<http://www.usp.br/fau/ensino/graduacao/disciplinas/paginas/conforto.html>>. Acesso em: jan 2007.
6. \_\_\_\_\_. **TAO: uma metodologia para implantação de edificação**. Tese (Livre Docência) — Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, Departamento de Tecnologia. São Paulo, 2007.
7. \_\_\_\_\_. **Vidros e policarbonatos na Arquitetura**. Desempenho térmico acústico, luminoso e economia de energia elétrica. São Paulo: FAUUSP, 1999. (Material desenvolvido para curso ministrado na FUPAM/FAUUSP em maio de 1999).
8. AKUTSU, M., VITTORINO, F. **Tratamento de dados climáticos para a avaliação do desempenho térmico de edificações** – Manual de Procedimentos (Aplicação à Cidade de São Paulo) - Anexo I. Publ. IPT 1732. São Paulo, 1998.
9. AKUTSU, M., SIQUEIRA, T., LOPES, J., SOUZA, H. **Dados climáticos para avaliação de desempenho térmico de edificações**. Rem: Rev. Esc. Minas, Jun 2005, vol.58, no.2, p.133-138. ISSN 0370-4467.
10. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR CONDITIONING (ASHRAE). **ASHRAE 55-1974**: Thermal environmental conditions for human occupancy. New York: ASHRAE, 1974.
11. \_\_\_\_\_. **ASHRAE 55-1981**: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta, Georgia: ASHRAE, 1981.

12. \_\_\_\_\_. **ASHRAE 55-1992**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: ASHRAE, 1992.
13. \_\_\_\_\_. **ASHRAE 55-2004**: Thermal environmental conditions for human occupancy. Atlanta: ASHRAE, 2004.
14. \_\_\_\_\_. **ANSI/ASHRAE/IESNA Standard 90.1-1989**: Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings. Atlanta, 1989.
15. \_\_\_\_\_. **ASHRAE Handbook** - Fundamentals. Atlanta: ASHRAE, 2005.
16. \_\_\_\_\_. **International Weather for Energy Calculations** (IWECC Weather Files) Users Manual and CD-ROM. Atlanta: ASHRAE, 2001.
17. \_\_\_\_\_. **A Standard for Natural Ventilation**. ASHRAE Journal, Outubro de 2000. Disponível em: < [www.ashrae.org](http://www.ashrae.org) >. Acesso em: out. 2005.
18. ANDRADE, C. M. **Avaliação de desempenho em edifícios de escritório**: o ambiente de trabalho como meio para o bem-estar produtivo. 2005. Tese (Doutorado)—Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.
19. AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA (ANVISA). **Resolução RE9**. Orientação Técnica sobre Padrões Referenciais de Qualidade do Ar Interior, em ambientes climatizados artificialmente de uso público e coletivo. Brasília: ANVISA, 2003.
20. ARNOLD, D. **Mixed Mode HVAC. An Alternative Philosophy**. ASHRAE Transactions, v. 102, n.1, 1996.
21. ARONS, D.M.M.; GLICKSMAN, L.R. **Double Skin, Airflow Facades: Will the Popular European Model Work in the USA?** Proceedings of the ACE3 2000 Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, 2000.
22. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 16401**: Instalações centrais de ar-condicionado para conforto: parâmetros básicos de projeto. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.
23. \_\_\_\_\_. **NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro: ABNT, 2005.
24. \_\_\_\_\_. **NBR 15575**: Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos — Desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.
25. \_\_\_\_\_. **NBR 9077**: Saídas de emergência em edifícios. Rio de Janeiro:

- ABNT, 2001.
26. \_\_\_\_\_. **NBR 6485**: Caixilho para edificações – janela, fachada – cortina e porta externa – verificação de penetração de ar. Rio de Janeiro: ABNT,2000
  27. \_\_\_\_\_. **NBR 6486**: Caixilho para edificações – janela, fachada – cortina e porta externa – verificação de estanqueidade à água. Rio de Janeiro: ABNT,2000
  28. \_\_\_\_\_. **NBR 6487**: Caixilho para edificações – janela, fachada – cortina e porta externa – verificação de comportamento quando submetidos a cargas uniformemente distribuídas. Rio de Janeiro: ABNT,2000
  29. \_\_\_\_\_. **NBR 10820**: Caixilho para edificação – janela – terminologia. Rio de Janeiro: ABNT,1989
  30. \_\_\_\_\_. **NBR 10821**: Caixilho para edificação – janelas. Rio de Janeiro: ABNT,2000
  31. \_\_\_\_\_. **NBR 10829**: Caixilho para edificação – janela – medição de atenuação acústica – método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT,1989
  32. \_\_\_\_\_. **NBR 10830**: Caixilho para edificação - Acústica dos edifícios - Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT,1989
  33. \_\_\_\_\_. **NBR 10831**: Projeto e utilização de caixilhos para edificações de uso residencial e comercial – janelas. Rio de Janeiro: ABNT,1989
  34. BAKER, N.V. **Energy and environment in non-domestic buildings. A technical design guide**. Cambridge: Cambridge Architectural Research Ltd, 2000.
  35. BALOCCO, C. A simple model to study ventilated façades energy performance. **Energy and Buildings**, vol. 34, p. 469-475, 2002.
  36. Banco de Dados. **Características Térmicas, Luminosas e Acústicas de Vidros e Plásticos Translúcidos**. FAUUSP, 2005. Disponível em <<http://www.usp.br/fau/deptecnologia/docs/bancovidros/>>. Acesso em: jul 2007.
  37. BARLOW, S., FIALA, D. Occupant comfort in UK offices - How adaptive comfort theories might influence future low energy office refurbishment strategies. **Energy and Buildings**, vol. 39, p. 837-846, 2007.
  38. BATTLE, T. **The commercial offices handbook**. London: RIBA Enterprises, 2003.

39. BENEDETO, G. S. Avaliação da aplicação do modo misto na redução da carga térmica em edifícios de escritórios nas cidades de São Paulo e Rio de Janeiro. Dissertação (Mestrado – Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura) – FAUUSP. São Paulo: FAUUSP, 2007.
40. **BCO Guide 2000**. British Council for Offices. London, 2000.
41. BDSP PARTNERSHIP. **Swiss Re House, London, Environmental Performance Report, Natural Ventilation**. London, October 1998.
42. BESTFACADE project EIE/04/135/S07.38652, Publishable Report: **Best Practice for Double Skin Façades**. Disponível em: <<http://www.bestfacade.com>>. Acesso em: 26 Fev. 2008.
43. **Bloomberg**. Entrevista com Fabio Maceira, Presidente da Consultoria Imobiliária Jones Lang La Salle. Bloomberg. 9 de julho de 2008. Disponível em: <<http://www.globoaovivo.com.br/bloomberg-brasil.html>>. Acesso em: nov de 2008.
44. BRAGER, G. S.; DEAR, J. D. A standard for natural ventilation. **ASHRAE Journal**, 2000.
45. \_\_\_\_\_. Thermal Adaptation in the built environment: a literature review. **Energy and Buildings**, Volume 27, 1998, p. 83-96
46. \_\_\_\_\_. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and Buildings**, Volume 34, 2002, p. 549-561.
47. **BRE Environmental Design Manual**. Garston: Building Research Establishment, 1994.
48. BRITISH STANDARD INSTITUTION. **BSI-BS 5925: Code of Practice for Ventilation**. Principles and Designing for Natural Ventilation. London, 1991.
49. **Building Regulations 2000**. Approved Document L1A: Conservation of Fuel and Power. NBL – RIBA Enterprises: London, 2006
50. CAPUCHINHO, C. Superocupados. **Folha de S Paulo**. 24 de agosto de 2008.
51. CASSARO, F. Oferta baixa, preço alto. **Veja SP**. 17 de setembro de 2008.
52. CARMODY at al. **Window systems for high performance buildings**. United States of America: The Regents of the University of Minnesota, 2004.
53. CBRE. **Eldorado Business Tower** – Folder de Divulgação. São Paulo: CB Richerd Ellis, 2007.

54. **CFX v. 5.7.** ANSYS Inc, 2005.
55. **CIBSE Applications Manual.** London: The Chartered Institution of Building Services Engineers, 1997.
56. CIBSE Applications Manual AM10. **Natural ventilation in non-domestic buildings.** London: The Chartered Institution of Building Services Engineers, 2005.
57. CIBSE Applications Manual AM11. **Building energy and environmental modelling.** London: The Chartered Institution of Building Services Engineers, 1998.
58. CIBSE Applications Manual AM13. **Mixed mode Ventilation.** London: The Chartered Institution of Building Services Engineers, 2000.
59. CIBSE Lighting Guide LG10. **Daylighting and window design.** London: The Chartered Institution of Building Services Engineers, 1999.
60. **CITY OF MELBOURNE.** Disponível em: <<http://www.melbourne.vic.gov.au/>>. Acesso em: 06 de novembro de 2008
61. **CÓDIGO DE OBRAS e Edificações do Município de São Paulo.** Vol. 37. 2ª edição. São Paulo, Sp, Brasil: Editora Atlas, 1993.
62. CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos: conforto ambiental.** Rio de Janeiro: Revan, 2003.
63. CORBIOLI, N. Aflalo & Gasperini Arquitetos. Edifícios de escritórios, São Paulo e Rio de Janeiro. **PROJETODESIGN**, Edição 331, Setembro de 2007. Disponível em: <<http://www.arcoweb.com.br/arquitetura/arquitetura803.asp>>, acesso em 16 set 2008.
64. CORNEY, A. **Melbourne City Council Offices (CH2). Renewable Energy Report – Solar.** Advanced Environmental Concepts Pty Ltd, Sydney, march 2003
65. \_\_\_\_\_. **Melbourne City Council Offices (CH2). North Façade Analysis.** Advanced Environmental Concepts Pty Ltd, Sydney, april 2003
66. **CORPORATION OF LONDON.** Disponível em: <<http://www.cityoflondon.gov.uk>>. Acesso em: agosto de 2008.
67. CSILLAG, D. **Análise das Práticas de Sustentabilidade de Construções Latino-Americanas.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo, 2007.

68. CÓSTOLA, D. **Ventilação por Ação dos Ventos: Procedimento para Quantificação**. Dissertação (Mestrado) – FAUUSP. São Paulo: FAUUSP, 2006.
69. CÓSTOLA, D.; BLOCKEN, B.; HENSEN, J. Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. **Building and Environment** 2009; 44:2027-2036.
70. CRAWLEY, D.; HAND J.; KUMMERT M.; GRIFFITH B. **Contrasting the capabilities of building energy performance simulation programs**. US Department of Energy, University of Strathclyde, University of Wisconsin-Madison and National Renewable Energy Laboratory, Version 1.0, 2005.
71. CUNHA, E. G., VAUPEL, K., LÜCKING, R. **Determinação da Necessidade de Aquecimento de Edificações Residenciais na Cidade de Porto Alegre, RS, com Base no Processo Simplificado da Norma Alemã EnEV 2007**. NUTAU 2008 – Seminário Internacional. O Espaço Sustentável – Inovações em Edifícios e Cidades. São Paulo: NUTAU, 2008. Versão eletrônica do artigo disponível em: <<http://www.usp.br/nutau/CD/49.pdf>>. Acesso em: jul 2009.
72. DEAR, Richard; BRAGER, Gail; COOPER, Donna. **Developing an adaptative model of thermal comfort and preference**. Sydney: ASHRAE, 1997. (ASHRAE FINAL REPORT RP-884).
73. **Decreto Estadual SP 46.076/04**. Legislação do Estado de São Paulo, 2004.
74. **DOE-2**. U. S. Department of Energy and Lawrence Berkeley National Laboratory's Simulation Research Group, 1998.
75. DUARTE, D., SOUZA T. **Padrões de ocupação do solo e microclimas urbanos em São Paulo – SP**. Proceedings NUTAU 2004 - DEMANDAS SOCIAIS, INOVAÇÕES TECNOLÓGICAS E A CIDADE. São Paulo: NUTAU/FUPAM, 2004.
76. EDSL. **A-Tas Theory Manual**. London: Environmental Design Solutions Limited, 2004.
77. EDWARDS, B.; HYETT, P. **Rough guide to sustainability**. London: RIBA Companies Ltd., 2002.
78. ELDIN, A. A parametric model for predicting wind-induced pressures on low-rise vertical surfaces in shielded environments. **Solar Energy**, Volume 81, p. 52-61, 2007.
79. Energy Information Administration (EIA). **International Energy Outlook 2009**. DOE/IEA, 2009. Documento eletrônico disponível em: <<http://www.eia.doe.gov/oiaf/aeo>>. Acesso em: out 2009.

80. **EnergyPlus Input Output Reference**. Manual de utilização do software EnergyPlus. Disponível em: <<http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus/>>. Acesso em: jun de 2007
81. ERHORN, H. **Best Façade WP 4 Report “Simple calculation method”**. Fraunhofer-Institute for Building Physics: Stuttgart, Germany, 2007.
82. **ESRU**. Esp-r: a building and plant energy simulation environment. User Guide, Version 10 Series. ESRU Publication: University of Strathclyde, Glasgow, UK, 2002.
83. ETHERIDGE, D. W., FORD, B. **Natural ventilation of tall buildings – options and limitations**. Proceedings. CTBUH 8th World Congress. Tall and Green: Typology for a Sustainable Urban Future. The Council on Tall Buildings and Urban Habitat: Dubai, 3 – 5 de março, 2008
84. Fachada dupla pele. In **Finestra Brasil**. São Paulo, ano 7, n.30, jul/set 2002, p.73-77. São Paulo: 2002.
85. FANGER, P. O. **Thermal comfort: Analysis and applications in environmental engineering**. United States: McGraw-Hill, 1972.
86. FANGER, P., TOFTUM, J. Extension of the PMV model to non-air-conditioned buildings in warm climates. **Energy and Buildings**, volume 34, p. 533-536, 2002.
87. FIGUEIREDO, C. **Ventilação Natural em Edifícios de Escritórios na Cidade de São Paulo: Limites e Possibilidades**. Dissertação (Mestrado)—FAUUSP. São Paulo: FAUUSP, 2007.
88. FIGUEROLA, V. N. Complexo Verde. **Téchne**. n.129, p. 40-44, dezembro de 2007.
89. FISCH, M. N. **Energy Efficient Commercial Buildings in Germany. Design Concepts and Operational Results**. ARKPARK 2008, Istanbul: 2008.
90. FOSTER, N. **The Third Industrial Revolution**. Free University, Berlin: 2008.
91. FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 2. ed. São Paulo: Editora Nobel, 1995.
92. **FUNDAÇÃO VANZOLINI**. Disponível em: <<http://www.vanzolini.org.br/>>. Acesso em: 25 nov 2009.
93. GARÇON, J. Investimento Concreto. **Exame**. 24 de setembro de 2008

94. GAUZIN-MÜLLER, D. **Sustainable architecture and urbanism**. Basel; Berlin; Boston: Birkhäuser, 2002.
95. GHIAUS, C. Free-running building temperature and HVAC climatic suitability. **Energy and Buildings**, v.35, p. 405-411, 2003.
96. GIVONI, B. *Climate considerations in buildings and urban design*. New York: John Wiley & Sons, 1998.
97. \_\_\_\_\_. Comfort climate analysis and building design guidelines. **Energy and Buildings**, v.18, n. 1, p. 11-23, 1992.
98. \_\_\_\_\_. **Man, climate and architecture**. London: Applied Science, 1976
99. GONÇALVES, J., ROMÉRO, M. A arquitetura de edifícios altos em São Paulo: aspectos da cidade, da verticalidade, da forma e da climatização (Parte I). **Climatização**, São Paulo, ano 2, n.11, p.40-44, julho 2001.
100. GONÇALVES, J., ROMÉRO, M. A arquitetura de edifícios altos em São Paulo: aspectos da cidade, da verticalidade, da forma e da climatização (Parte II). **Climatização**, São Paulo, ano 2, n.12, p.38-43, agosto 2001.
101. GONCALVES, J. C. **A sustentabilidade do edifício alto. Uma nova geração de edifícios altos e sua inserção urbana**. Tese de doutorado, FAUUSP. São Paulo: FAUUSP, 2003.
102. \_\_\_\_\_. **The challenges of tall buildings**. In: NUTAU'2002. Seminário Internacional: CD-ROM e Caderno de Resumos. Universidade de São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Departamento de Tecnologia da Arquitetura, Núcleo de Pesquisa em Tecnologia da Arquitetura e Urbanismo. São Paulo: NUTAU, 2002.
103. \_\_\_\_\_. **The Dilemma of the Verticality in the Biggest City of South America, São Paulo: Rethinking the tall building towards an environmentally friendly approach**. In: Architecture, City, Environment. Proceedings of PLEA 2000 Conference. The 17<sup>th</sup> International Conference on Passive and Low Energy Architecture. Cambridge: PLEA, 2000, p. 713-718.
104. GRADILONE, C. Canteiro de Obras. **Veja SP**, n.45, p. 10-12, São Paulo, Nov 2007.
105. GRATIA, E., HERDE, A. Design of low-energy office buildings. **Energy and Buildings**, Volume 35, p. 473-491, 2003.
106. \_\_\_\_\_. Natural ventilation in a double-skin facade. **Energy and Buildings**, Volume 36, n. 2, p. 137-146, 2004.

107. \_\_\_\_\_. Optimal operation of a south double-skin facade. **Energy and Buildings**, Volume 36, n. 1, p. 41-60, 2004.
108. \_\_\_\_\_. Are energy consumptions decreased with the addition of a double-skin? **Energy and Buildings**, Volume 39, n. 5, p. 605-619, 2007.
109. \_\_\_\_\_. Guidelines for improving natural daytime ventilation in an office building with a double-skin facade. **Solar Energy**, Volume 81, n. 4, p. 435-448, 2007.
110. \_\_\_\_\_. The most efficient position of shading devices in a double-skin facade. **Energy and Buildings**, Volume 39, n. 3, p. 364-373, 2007.
111. **Green Building Council Barsil (GBC Brasil)**. Disponível em: <<http://www.gbc.org.br/>>. Acesso em: 23 nov 2009.
112. HENSEN, J., Bartak, M., Drkal, f. **Modeling and Simulation of a Double-Skin Façade System**. ASHRAE Transactions, Vol 108, Part 2, 2002.
113. HERNANDEZ, T.Z. **LEED-NC como sistema de avaliação de sustentabilidade: uma perspectiva nacional?** Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP. São Paulo: FAUUSP, 2007.
114. HERNANDEZ, N., TRIBESS A., FIORELLI A. **Evaluation of thermal performance index for air conditioning commercial buildings**. COBEM 2003, Proceedings. São Paulo: ABCM, 2003.
115. **HERON TOWER**. Disponível em: <<http://www.herontower.com/>>. Acesso em: outubro de 2008.
116. HOSEGGEN, R., WACHENFELDT, B. HANSEN, S. Building simulation as an assisting tool in decision making. Case study: with or without a double-skin façade? **Energy and Buildings**. Article in Press, 2007.
117. INATOMI, T. H., MOTEZUKI, F. K., LEITE, B. C., CHENG, L. **Estudo de uma estratégia para controle fuzzy de ambientes condicionados com o sistema UFAD**. ENCAC 2007 - IX Encontro Nacional e V Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Proceedings. Ouro Preto: ENCAC, 2007.
118. INTERNATIONAL ENERGY AGENCY – IEA. **Key world energy statistics**. France: STEDI MEDIA, 2009.
119. \_\_\_\_\_. **Report IEA-PVPS T1-18:2009**. Photovoltaic Power Systems Programme, IEA-PVPS, 2009. Versão eletrônica do documento disponível em: <<http://www.iea-pvps.org/>>. Acesso em: set 2009

120. INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. Rio de Janeiro: Ed. LTC, 2003.
121. **Instrução Técnica Nº 09**. Legislação do Estado de São Paulo, 2004.
122. 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.
123. INTERNATIONAL ORGANIZATION STANDARDIZATION (ISO). **ISO 7730. Ergonomics of the thermal environment - Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria**. Genève: ISO, 2005.
124. IPT. Relatório Técnico de nº. 72.919-205. **Validação de softwares aplicativos para simulação do comportamento técnico de habitações**. Divisão de Engenharia Civil, Agrupamento de Componentes e sistemas Construtivos. São Paulo: IPT, 2004.
125. Jones, W. **Council House 2, Melbourne: Australia's greenest office building**. Building Design, London, 29 January, 2008. Disponível em: <<http://www.bdonline.co.uk/>>. Acesso em: 24 de setembro de 2008.
126. KARLSSON, J., ROOS, A.. Evaluation of window energy rating models for different houses and European climates. **Solar Energy**, vol. 76, p. 71–77, 2004.
127. KISS, P. **Muito barulho por tudo**. PiniWeb, 11 nov 1999. Disponível em: <<http://www.piniweb.com.br/construcao/noticias/muito-barulho-por-tudo-85157-1.asp>>. Acesso em: 04 fev 2009.
128. LABORATÓRIO DE CONFORTO AMBIENTAL E EFICIÊNCIA ENERGÉTICA – LABAUT. **Cenpes-II, arquitetura e ecoeficiência: clima, insolação e índices de conforto**. São Paulo: FAUUSP, 2004. (Relatório técnico de acesso restrito).
129. LAMBERTS, R., GOULART, S., CARLO, J., WESTPHAL, F., PONTES, R. **Regulamentação de etiquetagem voluntária de nível de eficiência energética de edifícios comerciais e públicos**. ENCAC 2007 - IX Encontro Nacional e V Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Proceedings. Ouro Preto: ENCAC, 2007.
130. LEÃO, M., MÜSCH, W., FISCH, M., LEÃO, E., KUCHEN, E. **The Evolution of Energy Efficiency Policy in Germany and the EnEV 2007**. PLEA 2008 – 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture,

Dublin, October 2008.

131. LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. **High-Performance Commercial Building Façades**. University of California, Berkeley, 2002. Disponível em: <<http://gaia.lbl.gov/>>. Acesso em: 3 abr 2007.
132. LEITE, B. C. C. **Sistema de ar-condicionado com insuflamento pelo piso em ambientes de escritórios: avaliação do conforto térmico e condições de operação**. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo: POLIUSP, 2003.
133. MARCONDES, M. P. **Double-Skin façades in high-rise office buildings in São Paulo. A possible environmental efficient solution?** 2004. Dissertação (Mestrado)—AA Graduate School MA Environment & Energy Studies. London, 2004.
134. MARCONDES, M., UMAKOSHI, E. **CFX vs. Envi-met: ferramentas computacionais para avaliação ambiental de áreas urbanas. Estudo de caso em São Paulo**. ENCAC 2007 - IX Encontro Nacional e V Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Proceedings. Ouro Preto: ENCAC, 2007.
135. MELARAGNO, M. **Wind in Architectural and Environmental Design**. Van Nostrand Reinhold: New York, 1982.
136. **MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA**. Balanço Energético Nacional 2009 – Ano base 2008: Resultados Preliminares. Rio de Janeiro: EPE, 2009.
137. \_\_\_\_\_. **Regulamentação para Etiquetagem Voluntária de Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos**: Versão experimental aprovada pelo Comitê Gestor de Indicadores e Níveis de Eficiência Energética - CGIEE - em reunião do dia 12 de setembro de 2006. Versão eletrônica do documento recebida por email através da “Lista de Conforto Ambiental” mantida pela UFRN, enviado por Joice Carlo em abril de 2007.
138. \_\_\_\_\_. **Manual para aplicação dos Regulamentos: RTQ-C e RAC-C**. Disponível em: <<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001424.pdf>>. Acesso em: 17 jul 2009.
139. **MINISTÉRIO DO TRABALHO**. **NR-15**, de 8 de julho de 1978. Atividades e operações insalubres. Disponível em: <<http://www.toxikon.com.br/nr15.html#INICIO>>. Acesso em: 03 jan. 2005.
140. Morris-Nunn, R. CH2 - Six stars, but is it Architecture? The City of Melbourne's new office building. **Architecture Australia**, Port Melbourne Victoria Australia, Issue jan/feb 2007. Disponível em: <<http://www>>

architectureaustralia.com/>. Acesso em: 24 de setembro de 2008.

141. MOUJALLED, B., CANTIN, R., GUARRACINO, G. Comparison of Thermal Comfort Algorithms in Naturally Ventilated office buildings. **Energy and Buildings**, vol. 40, p.2215-2223, 2008.
142. MÜLFARTH, R. C. K. **Arquitetura de baixo impacto humano e ambiental**. Tese de doutorado, FAUUSP. São Paulo: FAUUSP, 2003.
143. MOURA, E. Fachada Inteligente – Eldorado Business Tower. **Téchne**, n.129, p. 34-38, São Paulo, dezembro de 2007.
144. NICOL, J., HUMPREYS, M. Adaptive thermal comfort and sustainable thermal standards for buildings. **Energy and Buildings** Volume 34, p. 563-572, 2002.
145. OESTERLE, L., HEUSLE, L. **Double-skin façades. Integrated Planning**. Munich: Prestel Verlag, 2001.
146. PAIVA, C., SILVA, J. Vidros vedam e criam estruturas – Eldorado Business Tower. **Finestra**, n.55, abr/mai/jun 2008, p. 28-41.
147. PAIVA, C. Fachada do hall ganha transparência – Rochaverá Corporate Towers. **Finestra**, n.55, out/nov/dez 2008, p. 28-41.
148. PAEVERE, P., Brown, S. **Indoor Environment Quality and Occupant Productivity in the CH2 Building: Post-Occupancy Summary**. Report No. USP2007/23. CSIRO, March 2008.
149. PASQUAY, T. **Natural ventilation in high-rise buildings with double facades, saving or waste of energy**. The 18th PLEA Conference. Florianópolis: PLEA, 2001.
150. PFAFFEROTT, J., HERKEL, S., KALZ, D., ZEUSCHNER, A. Comparison of low-energy office buildings in summer using different thermal comfort criteria. **Energy and Buildings**, vol. 39, p. 750–757, 2007.
151. PEEL, M., Finlayson, B., McMahon, T. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, Vol 11, p.1633–1644, 2007.
152. PIRRÓ, L. S. **O impacto das envoltentes verticais no desempenho energético de edifícios de escritórios**. Tese de doutorado, FAUUSP. São Paulo: FAUUSP, 2005.
153. **Planning Report PDU/01201/01 – DIFA Tower**. Corporation of London,

- 15 december 2005. Disponível em: < <http://www.cityoflondon.gov.uk> >. Acesso em: agosto de 2008.
154. **Planning report PDU/0551/01 - 122 Leadenhall Street.** Corporation of Fondon, 1 September 2004. Disponível em: < <http://www.cityoflondon.gov.uk> >. Acesso em: agosto de 2008.
155. POIRASIS, Harris. **Double skin façades. A Literature Review.** A report of IEA SHC Task 34 ECBCS Annex 43. Division of Energy and Building Design, Department of Architecture and Built Environment, Lund Institute of Technology, Lund University, 2006. Report EBD-R--04/3
156. \_\_\_\_\_. **Single and Double Skin Glazed Office Buildings. Analyses of Energy Use and Indoor Climate.** Division of Energy and Building Design, Department of Architecture and Built Environment, Lund University. Faculty of Engineering LTH, 2008. Report EBD-T--08/8
157. QUINTÃO, Q. Aluguel Comercial Segue Aquecido no Mercado Paulista. **O Estado de S. Paulo.** 1 de agosto de 2008.
158. REISER, C., DAVID, R., FAIGL, M., BAUMANN, O. **DIN 18599 – Accounting for primary energy. New code requires dynamic simulation.** SimBuild 2008. Third National Conference of IBPSA-USA.. Berkeley: SimBuild, 2008.
159. **REZENDE, R.** Entrevista realizada com o arquiteto Ruy Rezende da RRA Arquitetura, autor do projeto do Edifício Cidade Nova, no Rio de Janeiro, para a pesquisa de doutorado. Rio de Janeiro, julho de 2008.
160. RIJAL, H., TUOHY, P., HUMPHREYS, M., NICOL, J., SAMUEL, A., CLARKE, J. Using results from field surveys to predict the effect of open windows on thermal comfort and energy use in buildings. **Energy and Buildings**, Vol. 39, p. 823-836, 2007.
161. ROMÉRO, M. A. **Arquitetura, comportamento e energia.** Livredocência. Faculdade de Urbanismo e Arquitetura da Universidade de São Paulo. São Paulo: FAUUSP, 1997.
162. \_\_\_\_\_. **Diagnóstico e avaliação energética e comportamental. Edifício Birmann 21.** Relatório de pesquisa. São Paulo: NUTAU, FAUUSP, 1999.
163. ROMERO, M., GONÇALVES, J., DILONARDO, L.. **A Evolução da Arquitetura e dos Aspectos Energéticos dos Edifícios de Escritórios nos últimos 30 anos na Cidade de São Paulo.** In: V Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído – V ENCAC, Proceedings. Fortaleza, 1999.

164. \_\_\_\_; DILONARDO, L.; GONÇALVES, J. C. **Retrofit in Buildings in Brazil: What is possible to do?** In: Architecture, City, Environment. Proceedings of PLEA2000 Conference. The 17th International Conference on Passive and Low Energy Architecture, PLEA p. 284-285. Cambridge: PLEA, 2000.
165. \_\_\_\_ et al. Avaliação pós-ocupação (APO) aplicada no Edifício Torre Norte do Centro Empresarial Nações Unidas (CENU) em São Paulo/SP. **Relatório de análise comportamental e avaliação física do conforto ambiental, segurança contra incêndio e consumo de energia elétrica.** São Paulo: FAUUSP, 2005. (Relatório técnico de acesso restrito).
166. SANTAMOURIS, M. **Natural Ventilation in Buildings A Design Handbook**, United Kingdom: Cromwell Press, 2002.
167. SILVA, V. G. Avaliação da sustentabilidade de edifícios de escritórios brasileiros: diretrizes e base metodológica. Tese (Doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo: São Paulo, 2003.
168. SHARAG-ELDIN, A. A parametric model for predicting wind-induced pressures on low-rise vertical surfaces in shielded environments. **Solar Energy**, Vol. 81, p. 52-61, 2007.
169. SZOKOLAY, Steve. **Use of the new effective temperature: ET\* in practice.** In: PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE (PLEA), 18, 2001, Proceedings. Florianópolis: PLEA, p. 1003-1008, 2001.
170. TAILOR, I.; COMPAGNO A. **Intelligent Glass Facades.** Material Practice Design. Germany: Basel, 1995.
171. Tan, S. Melbourne City Council Offices (CH2). **Revised Building Energy Consumption.** Advanced Environmental Concepts Pty Ltd, Sydney, agosto 2004.
172. **TAS.** Versão 9.1.3. Milton Keynes: EDSL, Environmental Design Solutions Limited, 2009.
173. TEIXEIRA, D., BRIONIZIO, J., PEREIRA, L. **Síndrome dos Edifícios Doentes em Recintos com Ventilação e Climatização Artificiais: Revisão de Literatura.** INMETRO. Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <[http://www.inmetro.gov.br/producaointelectual/obras\\_intelectuais/224\\_obraIntelectual.pdf](http://www.inmetro.gov.br/producaointelectual/obras_intelectuais/224_obraIntelectual.pdf)>. Acesso em: 04 fev 2008.
174. The Bishopsgate Tower. **Environmental Statement.** Vol.1, 4 dec 2006. Disponível em: <<http://www.cityoflondon.gov.uk>>. Acesso em: agosto de 2008.

175. **THE LONDON PLAN: A Summary.** Greater London Authority, London: 2004.
176. **TRNSYS.** TRNSYS: a transient simulation program, reference manual. Wisconsin: Solar Energy Lab, University of Wisconsin-Madison, 2000.
177. UMAKOSHI, E. **Panorama Atual da Verticalidade.** Dissertação de Mestrado, FAUUSP. São Paulo, FAUUSP, 2008.
178. U.S. Green Building Council. **LEED for Core & Shell Development Rating System.** Disponível em: <www.usgbc.org>. Acesso em: 23 nov 2009.
179. VERONEZZI, A. P. **Sistema de certificação da qualidade de edifícios de escritórios no Brasil.** Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo: POLI USP, 2004.
180. **VISITA TÉCNICA** – Edifício St. Marys Axe (Swiss Ree). Visita técnica ao edifício St. Marys Axe, em Londres, assessorada pelo arquiteto Robert Harisson do escritório Foster & Partners, em abril de 2004.
181. **VISITA TÉCNICA** – Edifício Commerzbank. Visita técnica ao edifício Commerzbank, em Frankfurt Am Main, assessorada por Peter Muschelknautz, gerente de facilidades, em outubro de 2004.
182. **VISITA TÉCNICA** – Edifício Eldorado Business Tower. Visita técnica ao edifício Eldorado Business Tower, em São Paulo, assessorada por Clarissa Bolivar, arquiteta, em abril de 2007.
183. **VISITA TÉCNICA** – Edifício Cidade Nova. Visita técnica ao edifício Cidade Nova, no Rio de Janeiro, assessorada por Romulo Ramos, em julho de 2008.
184. VITTORINO, F., AKUTSUM., TRIBESSA., HERNANDEZA. **Strategies for energy conservation in air conditioning for office buildings in Brazil.** In: CIB Symposium on Construction & Environment Theory Into Practice, 1: 2000: São Paulo, Proceedings, CIB / PCC-EPUSP.
185. VITTORINO, F.; BENEDETTO G.; BUORO A.; BAZARIAN A. **Análise Comparativa na Simulação de Modelo Habitacional nos Softwares Energy Plus e Tas.** In: ENTAC 2006 - Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, Proceedings. Florianópolis: ENTAC, 2006.
186. Vosgueritchian, A. B. **A abordagem dos sistemas de avaliação de sustentabilidade da arquitetura nos quesitos ambientais de energia, materiais e água, e suas associações às inovações tecnológicas.** Dissertação de Mestrado, FAUUSP. São Paulo, FAUUSP, 2006.

187. WAGNER, A. GOSSAUER, E., MOOSMANN, C., GROPP, T., LEONHART, R. Thermal comfort and workplace occupant satisfaction—Results of field studies in German low energy office buildings. **Energy and Buildings** Volume 39, p. 758–769, 2007.
188. WELLS, M. **Skyscrapers. Structure and design**. New Haven: Yale University Press, 2005.
189. WESTPHAL, F. S. **Análise de incertezas e de sensibilidade aplicadas à simulação de desempenho energético de edificações comerciais**. Tese de Doutorado submetida à Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis: UFSC, 2007.
190. \_\_\_\_\_. Entrevista com o consultor e engenheiro especialista em eficiência energética de edifícios como parte da pesquisa realizada para a elaboração da tese, sobre os edifícios de escritórios projetados e construídos na cidade de São Paulo na segunda metade da década de 2000. São Paulo, novembro de 2008.
191. WESTPHAL, F. S., LAMBERTS, R. **Análise do impacto de variáveis arquitetônicas e cargas internas no consumo de energia em condicionamento de ar de edificações comerciais**. ENCAC 2007 - IX Encontro Nacional e V Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Proceedings. Ouro Preto: ENCAC, 2007.
192. WILCOX, S.; W. MARION. **User's Manual for TMY3 Data Sets, NREL/TP-581-43156**. April 2008. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory, 2008.
193. WORLD GREEN BUILDING COUNCIL. **Shiodome Tower**. Disponível em: <<http://www.worldgbc.org/images/stories/pdf/ShiodomeTower.pdf>>. Acesso em: 27 março 2007.
194. YAO, R., LI, B., STEEMERS, K., SHORT, A. Assessing the natural ventilation cooling potential of office buildings in different climate zones in China. **Renewable Energy**, Vol. 34, n. 12, p. 2697-2705, 2009.





# Apêndices



## Apêndice A

**Resultado detalhado do cálculo da vazão de ar por efeito chaminé, segundo método proposto em Frota & Schiffer (1995), para os cenários de análise da pesquisa**

Tabela 32. Resultado detalhado do cálculo de vazão de ar por efeito chaminé, segundo método proposto em Frota & Schiffer (1995)

### Vazão de ar por Efeito Chaminé (vz A)

cenário / orientação	$\phi$ (m <sup>3</sup> /s)	$\phi$ (vol/h)
Ret Livre	3,13	5,6
Quad Livre	3,68	6,6
Ret/Quad Celular	0,16	6,4

incremento aberturas diferentes (gráfico Frota, 1995) = **1,09**

Resultado final:

cenário / orientação	$\phi$ (m <sup>3</sup> /s)	$\phi$ (vol/h)
Ret Livre	<b>3,41</b>	<b>6,1</b>
Quad Livre	<b>4,02</b>	<b>7,1</b>
Ret/Quad Celular	<b>0,17</b>	<b>7,0</b>

## Apêndice B

### Cálculo da vazão de ar por efeito chaminé segundo método proposto pela norma inglesa BS 5925 (1991) para os cenários de análise da pesquisa.

A vazão de ar por efeito chaminé (vz A) para um ambiente de planta livre, com aberturas em superfícies opostas, segundo método da norma BS 5925 (1991), pode ser calculada por:

$$\Phi_{ch} = C_d \times A_o \times \frac{(2\Delta T \times g \times H_1)^{0,5}}{T} \quad \text{m}^3/\text{s}$$

Onde:

$C_d$  é o coeficiente de perda de carga da abertura; valor entre 1 e 0 que fornece a parcela útil da energia para a ventilação. O valor comumente utilizado para  $C_d$  é 0,6. (Frota & Schiffer, 1995; Cóstola, 2006; Alucci, 2007)

$A_o$  é a área equivalente de aberturas para ventilação, calculada por:

$$\frac{1}{(A_o)^2} = \frac{1}{(A_e)^2} + \frac{1}{(A_s)^2} \quad \text{m}^2$$

$A_e$  é a área de entrada do vento

$A_s$  é a área de saída do vento

$T$  é a temperatura média, calculada por:

$$T = \frac{T_e + T_i}{2} \quad ^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = T_i - T_e$$

$T_e$  é a temperatura externa, do banco de dados = 22°C

$T_i$  é a temperatura interna

$$g = 9,81 \text{ m/s}^2$$

Já a vazão de ar por efeito chaminé das salas centrais do edifício de escritórios com layout celular pode ser calculada pelo método da norma inglesa BS 5925 (1991) para um ambiente com abertura unilateral, com a equação:

$$\Phi_{ch} = C_d \times A_o \times \left( \frac{\varepsilon \sqrt{2}}{(1 + \varepsilon)(1 + \varepsilon^2)^{1/2}} \right) \frac{(\Delta T \times g \times H_1)}{T} \quad \text{m}^3/\text{s}$$

Onde:

$$A_o = A_e + A_s \quad \text{m}^2$$

$$\varepsilon = A_s / A_e$$

### Apêndice C

#### Resultado detalhado da avaliação de desempenho térmico dos cenários de edifícios com simulação computacional

Tabela 33. Resultado detalhado da avaliação de desempenho térmico dos cenários de edifícios com simulação computacional

Tabela Resultados Simulações

	Cenários	Zona/sala	Vazão de ar		hs	hs	hs	Conforto Anual (%)	Q <sub>T</sub> anual (MW)	Q <sub>f</sub> máx (W/m <sup>2</sup> fach)	
			(m <sup>3</sup> /s)	(vol/h)	calor	conforto	frio				
Vazão A - efeito chaminé	Layout Livre	1 PI Ret Livre NS	zona N	3,41	6,1	38,8	59,9	1,3	61,2	98,8	207,3
		2 zona S	3,41	6,1	29,4	68,3	2,3	70,6	134,6		
		3 PI Ret Livre LO	zona L	3,41	6,1	41,6	56,9	1,5	58,4	109,8	221,4
		4 zona O	3,41	6,1	39,1	59,0	1,9	60,9	142,6		
		5 PI Ret Livre NE/SO	zona NE	3,41	6,1	42,5	56,3	1,2	57,5	106,2	225,2
		6 zona SO	3,41	6,1	34,1	64,0	2,0	66,0	132,0		
		7 PI Ret Livre NO/SE	zona NO	3,41	6,1	38,8	59,0	2,1	61,1	100,5	187,4
		8 zona SE	3,41	6,1	35,7	61,5	2,8	64,3	196,2		
		9 PI Quad Livre NSLO	zona N	4,02	7,1	46,0	52,7	1,2	53,9	139,4	229,6
		10 zona S	4,02	7,1	31,3	65,0	3,7	68,7	133,6		
		11 zona L	4,02	7,1	43,1	55,2	1,7	56,9	237,6		
		12 zona O	4,02	7,1	36,0	61,3	2,7	64,0	158,0		
	13 PI Quad Livre NE/SO/NO/SE	zona NE	4,02	7,1	47,6	51,3	1,1	52,4	139,2	257,2	
	14 zona SO	4,02	7,1	32,2	63,9	3,9	67,8	130,8			
	15 zona NO	4,02	7,1	42,2	56,0	1,8	57,8	195,2			
	16 zona SE	4,02	7,1	36,0	61,0	3,0	64,0	196,0			
	Layout Celular	17 PI Ret Celular NS	sala N	0,17	7	33,0	65,9	1,1	67,0	6,5	269,0
		18 sala S	0,17	7	17,0	76,2	6,8	83,0	3,5		148,8
		19 PI Ret Celular LO	sala L	0,17	7	37,1	60,9	2,0	62,9	6,5	306,6
		20 sala O	0,17	7	25,3	70,4	4,3	74,7	4,9		185,7
		21 PI Ret Celular NE/SO	sala NE	0,17	7	40,3	58,7	1,0	59,7	7,1	332,8
		22 sala SO	0,17	7	19,6	74,0	6,4	80,4	3,8		161,6
		23 PI Ret Celular NO/SE	sala NO	0,17	7	28,3	69,3	2,4	71,7	5,8	254,5
		24 sala SE	0,17	7	27,2	67,2	5,6	72,8	4,7		258,9
		25 PI Quad Celular NSLO	sala N	0,17	7	34,8	64,1	1,1	65,2	6,2	256,6
		26 sala S	0,17	7	19,0	74,4	6,6	81	3,4		141,7
		27 sala L	0,17	7	37,1	61,0	1,9	62,9	6,2		292,3
		28 sala O	0,17	7	25,0	71,2	3,8	75	4,7		177,4
		29 PI Quad Celular NE/SO/NO/SE	sala NE	0,17	7	41,5	57,5	1,0	58,5	6,7	317,3
		30 sala SO	0,17	7	20,5	73,2	6,3	79,5	3,6		154,1
		31 sala NO	0,17	7	29,2	68,6	2,2	70,8	5,5		242,7
		32 sala SE	0,17	7	28,0	66,9	5,1	72	4,4		246,8
Vazão B - efeito de vento	Layout Livre	33 PI Ret Livre NS	zona N	41,79	74,3	4,3	80,0	15,7	95,7	98,8	211,1
		34 zona S	41,79	74,3	3,1	77,6	19,3	96,9	148,0		
		35 PI Ret Livre LO	zona L	4,91	8,7	33,5	63,7	2,7	66,4	109,8	224,2
		36 zona O	4,91	8,7	31,2	65,5	3,4	68,9	147,8		
		37 PI Ret Livre NE/SO	zona NE	36,64	65,1	5,8	81,1	13,3	94,4	106,2	224,4
		38 zona SO	36,64	65,1	4,7	78,2	17,0	95,2	152,8		
		39 PI Ret Livre NO/SE	zona NO	25,66	45,6	10,6	78,3	11,1	89,4	100,5	187,4
		40 zona SE	25,66	45,6	9,0	78,8	12,2	91,0	206,2		
		41 PI Quad Livre NSLO	zona N	48,81	86,8	15,4	77,6	7,0	84,6	139,4	230,4
		42 zona S	48,81	86,8	9,3	77,6	13,1	90,7	146,4		
		43 zona L	48,81	86,8	16,4	76,0	7,6	83,6	258,8		
		44 zona O	48,81	86,8	12,2	76,5	11,4	87,9	173,6		
	45 PI Quad Livre NE/SO/NO/SE	zona NE	42,74	76,0	17,4	76,6	6,0	82,6	139,2	257,2	
	46 zona SO	42,74	76,0	10,7	76,1	13,2	89,3	155,2			
	47 zona NO	42,74	76,0	14,7	76,7	8,6	85,3	209,6			
	48 zona SE	42,74	76,0	12,9	76,0	11,1	87,1	226,8			
	Layout Celular	49 PI Ret Celular NS	sala N	0,27	11,1	21,0	76,5	2,5	79,0	6,5	271,5
		50 sala S	0,27	11,1	10,1	80,0	9,8	89,8	3,5		148,8
		51 PI Ret Celular LO	sala L	0,04	1,5	87,0	13,0	0,0	13,0	6,5	284,7
		52 sala O	0,04	1,5	75,3	24,6	0,1	24,7	4,9		173,6
		53 PI Ret Celular NE/SO	sala NE	0,18	7,2	39,4	59,6	1,0	60,6	7,1	333,3
		54 sala SO	0,18	7,2	19,0	74,3	6,7	81,0	3,8		161,6
		55 PI Ret Celular NO/SE	sala NO	0,12	5,1	36,8	61,7	1,5	63,2	5,8	254,9
		56 sala SE	0,12	5,1	33,8	62,4	3,8	66,2	4,7		245,5
		57 PI Quad Celular NSLO	sala N	0,27	11,1	22,8	74,8	2,3	77,1	6,2	258,9
		58 sala S	0,27	11,1	11,7	79,1	9,2	88,3	3,4		142,0
		59 sala L	0,04	1,5	79,7	20,3	0,1	20,4	6,2		283,1
		60 sala O	0,04	1,5	63,7	36,1	0,2	36,3	4,7		177,1
		61 PI Quad Celular NE/SO/NO/SE	sala NE	0,18	7,2	40,5	58,5	1,0	59,5	6,7	317,8
		62 sala SO	0,18	7,2	19,9	73,6	6,5	80,1	3,6		154,1
		63 sala NO	0,12	5,1	37,0	61,7	1,3	63	5,5		243,1
		64 sala SE	0,12	5,1	34,2	62,3	3,6	65,9	4,4		234,1

## Apêndice D

Gráficos da correlação “wvr x FS” para os vinte e três cenários de edifícios de estudo, válida para fachadas com “ $U \times \alpha = 1$ ”

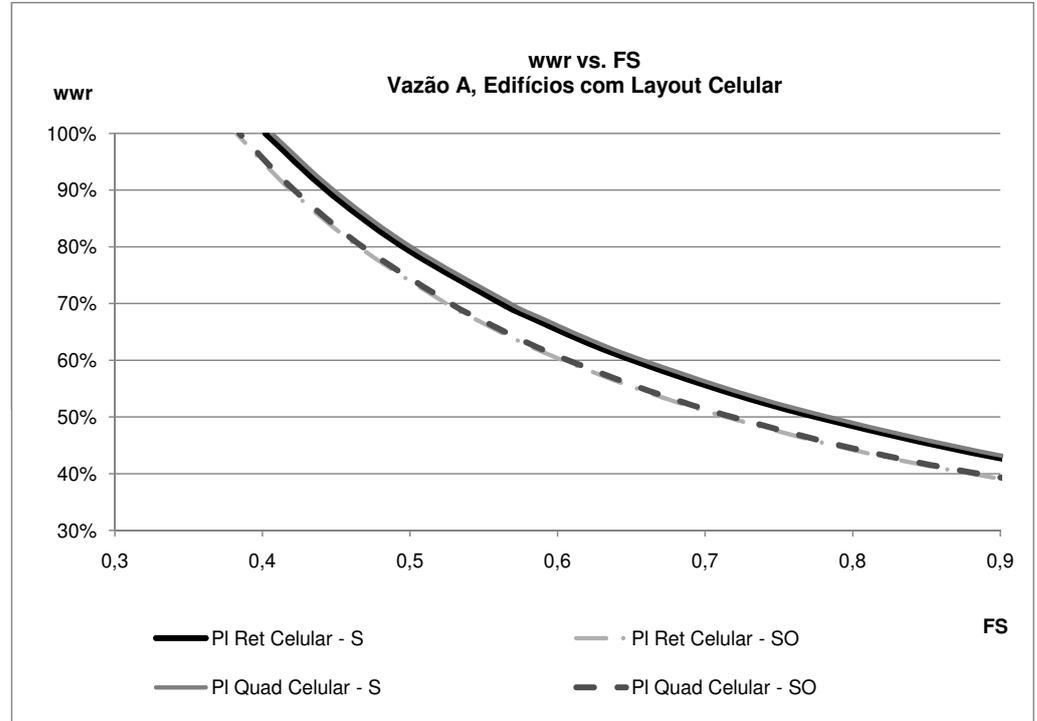


Figura 188. Valores de wvr e FS para fachadas dos cenários de edifícios com layout celular e vazão A (cenários 18, 22, 26 e 30), válidos para “ $U \times \alpha = 1$ ”

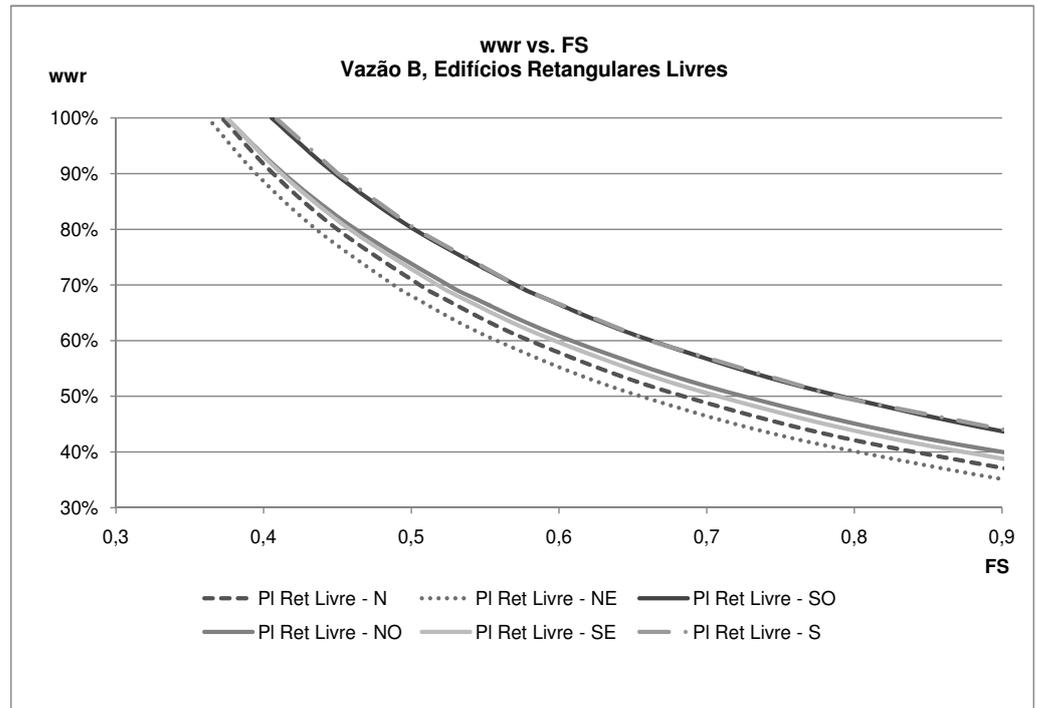


Figura 189. Valores de wvr e FS para fachadas dos cenários de edifícios retangulares livres e vazão B (cenários 33, 34, 37, 38, 39 e 40), válidos para “ $U \times \alpha = 1$ ”

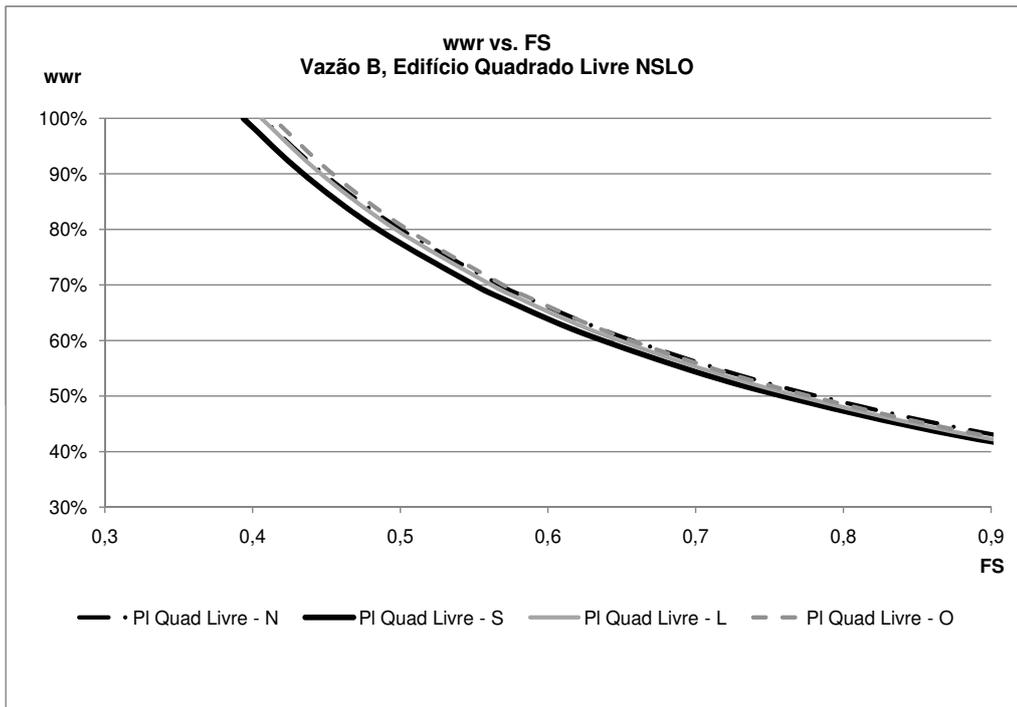


Figura 190. Valores de wvr e FS para fachadas dos cenários do edifício quadrado livre NSLO na vazão B (cenários 41 a 44), válidos para “ $Ux\alpha = 1$ ”

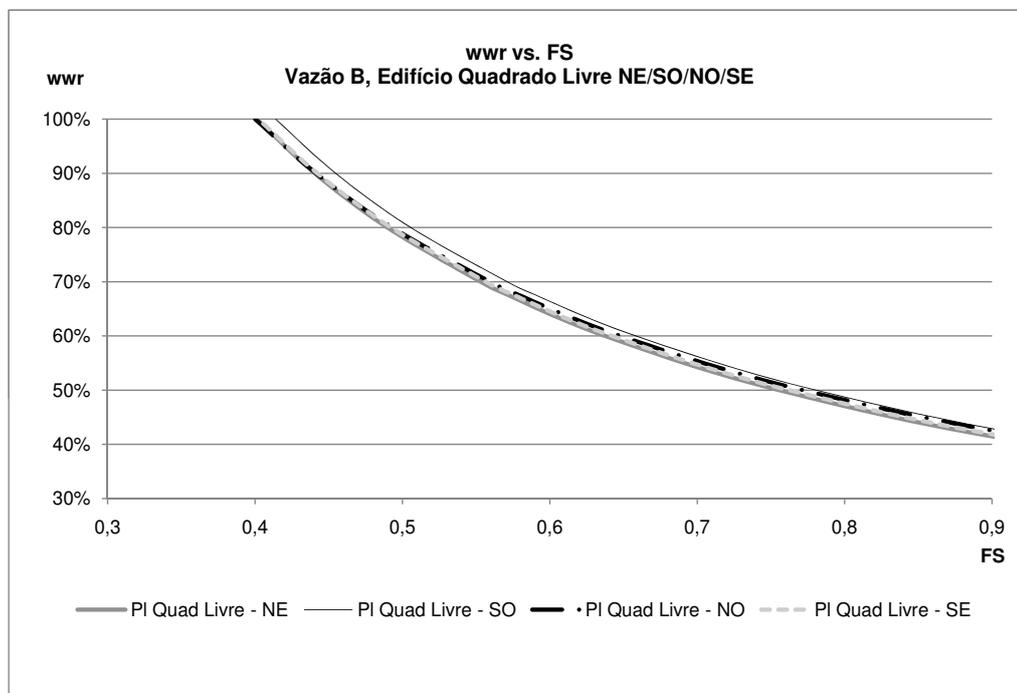


Figura 191. Valores de wvr e FS para fachadas dos cenários do edifício quadrado livre NE/SO/NO/SE na vazão B (cenários 45 a 48), válidos para “ $Ux\alpha = 1$ ”

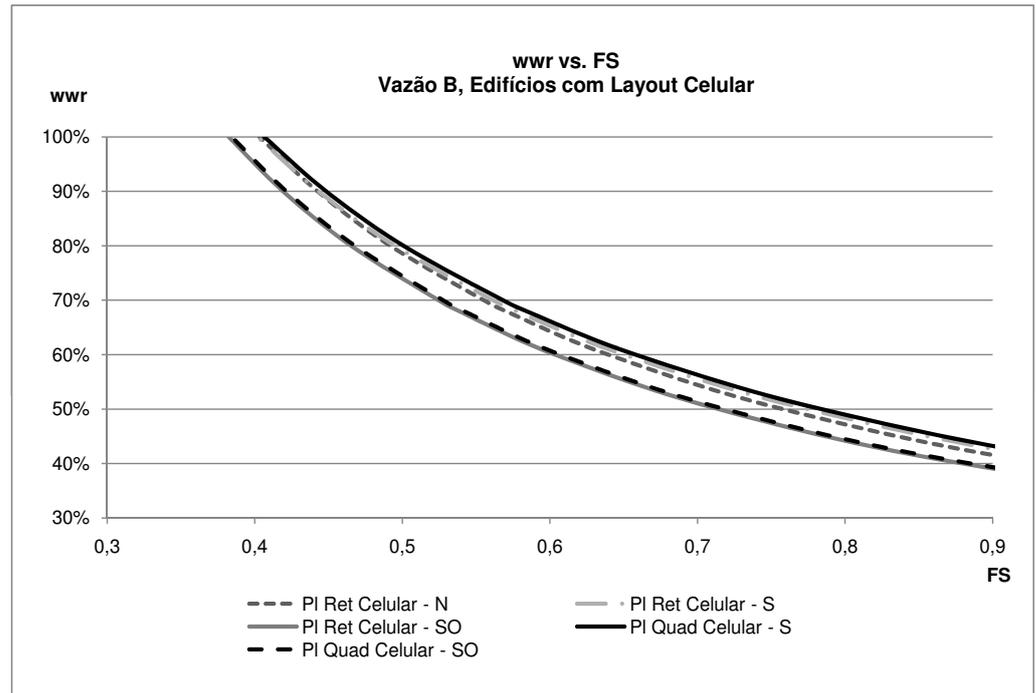


Figura 192. Valores de wwr e FS para fachadas dos cenários de edifícios com layout celular e vazão B (cenários 49, 50, 54, 58 e 62), válidos para “ $U_{\alpha} = 1$ ”

