

***FACULDADE DE ARQUITETURA E
URBANISMO DA USP
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO***

Estratégias de ventilação natural para edifícios de escritório em São Paulo com ênfase no desempenho de átrios

João Pinto de Oliveira Cotta

São Paulo, 2021

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

Nome do Candidato: João Pinto de Oliveira Cotta

NUSP: 10247918

Título do Trabalho: Estratégias de ventilação natural para edifícios de escritório em São Paulo com ênfase no desempenho de átrios

Curso de Doutorado: Doutorado em Arquitetura e Urbanismo

Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura

Linha de Pesquisa: Conforto Ambiental, Eficiência Energética e Ergonomia

Nome do Orientador: Joana Carla Soares Gonçalves

EXEMPLAR REVISADO E ALTERADO EM RELAÇÃO À VERSÃO ORIGINAL,
SOB RESPONSABILIDADE DO(A) AUTOR(A) E ANUÊNCIA DO(A)
ORIENTADOR(A).

A versão original, em formato digital, ficará arquivada na Biblioteca da Faculdade.

São Paulo, 02 de agosto de 2021

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

E-MAIL DO AUTOR: joao@oliveiracotta.com.br

Cotta, João

Estratégias de ventilação natural para edifícios de escritório em São Paulo com ênfase no desempenho de átrios / João Cotta; orientador Joana Gonçalves. - São Paulo, 2021. p 268.

Tese (Doutorado) - Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. Área de concentração: Tecnologia da Arquitetura.

1. Edifícios de Escritório - São Paulo. 2. Conforto Térmico. 3. Ventilação Natural. 4. Átrios. I. Gonçalves, Joana, orient. II. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família: minha esposa Mariana e meus filhos, Luiz e Catarina. Meus pais: João Luiz e Jussara, e meus irmãos Davi e Rosa.

Muito grato pelo apoio e pela compreensão ao longo de todo o trabalho

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a minha orientadora, Profa. Dra. Joana Carla Soares Gonçalves, que tem sido uma referência para mim desde o mestrado na AA School, em 2011, e por sempre manter uma postura alegre e otimista. Sua atenção, paciência, direcionamento, conselhos e orientação ao longo de toda a pesquisa foram fundamentais.

Aos professores que participaram da banca de qualificação: Profa. Dra. Alessandra Prata e Prof. Dr. Alberto Hernandez, pelas importantes contribuições que foram de grande valia para o desenvolvimento do trabalho.

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, pelos ensinamentos durante as disciplinas cursadas.

A todos os colegas da pós-graduação pelas trocas de experiências e pelos aprendizados ao longo desta jornada.

À talentosa arquiteta Carmen Pinos (Espanha), por ceder os desenhos técnicos, e memoriais descritivos do edifício Torre Cube, no México.

À equipe da incorporadora Grupo Cube, por permitir acesso ao edifício Torre Cube (Guadalajara, México) para a realização de pesquisa de campo e por todo o apoio durante a pesquisa.

A minha esposa Mariana, pela compreensão e pelo suporte para que fosse possível realizar esta pesquisa. Esta conquista também é sua!

Aos meus filhos, Luiz e Catarina, por alegrar meus dias.

A meus pais, João Luiz e Jussara, e aos meus irmãos, Davi e Rosa, por serem grandes incentivadores e por me apoiarem ao longo desta trajetória.

A Sandra Morikawa, pela amizade e pelo apoio durante todo o trabalho.

A Deus, por me dar força e fé para continuar sempre persistindo em busca de mais conhecimento.

RESUMO

COTTA, J.P.O. Estratégias de ventilação natural para edifícios de escritório em São Paulo com ênfase no desempenho de átrios. 2021. 268p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2021.

O desenvolvimento de tecnologias e sistemas prediais no século passado exerceu uma grande influência na abordagem metodológica de projetos para edifícios de escritório e ambientes de trabalho. Diante desse cenário, um estilo universal de arquitetura surgiu, com o qual novas edificações poderiam estar completamente desconectadas do clima, e dependendo dos sistemas de iluminação e condicionamento artificial durante todo o ano para alcançar o conforto dos usuários. Tais tendências de projeto vêm contribuindo significativamente para o aumento da demanda energética do setor de edificações no nível global. No Brasil, o uso de ar-condicionado é responsável por aproximadamente 47% da energia consumida para operação de edifícios de escritório.

Nesse contexto, a pesquisa realizará uma revisão crítica do modelo de edifício de escritório que vem sendo praticado na cidade de São Paulo desde o ano 2000, com foco no desempenho ambiental dessas edificações, propondo requalificações arquitetônicas que possam demonstrar o potencial de transformação do estoque predial existente em comparação com a construção de edifícios novos. A pesquisa dará ênfase às estratégias de ventilação natural por efeito chaminé, avaliando qual o impacto das soluções propostas no conforto térmico dos usuários e no desempenho energético do edifício.

Palavras-chave: Ventilação natural. Simulação Computacional. Análise de desempenho. Edifícios de escritório.

ABSTRACT

COTTA, J.P.O. Natural ventilation strategies for office buildings in São Paulo with focus on the performance of atriums. 2021. 268p. Thesis (Doctorate) – Faculty of Architecture and Urbanism, University of São Paulo, 2021.

The improvements in building technologies had a great impact and influence on the design solutions for office buildings and working environments, since last century. In this context, a universal style of architecture emerged, where building design could be completely independent of the exterior climate, relying all year round on artificial cooling and lighting to provide comfort. Since then, the technical aspects of building design for different climates and contexts have been neglected and an architectural style driven by the intention of exploring the building form and materiality, ascended worldwide.

This architectural approach is contributing to increase energy demand for buildings in many countries. In Brazil, the use of air conditioning is responsible for approximately 47% of the energy consumed in office buildings operation.

In this context, the research carried out a critical review concerning the typical typology of office building that has been applied in the city of São Paulo since the year 2000, with focus on the environmental performance. Additionally, this research proposed a retrofit strategy showing the potential to transform the existing building stock in comparison to the construction of new buildings.

The impact of natural ventilation strategies (especially stack ventilation), on thermal comfort and energy demand of buildings were the main focus of this thesis.

Keywords: Natural ventilation. Computational simulation. Performance analysis. Office buildings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Sede do banco Commerzbank em Frankfurt – Alemanha: a vista dos sky gardens demonstra a possibilidade de utilização de áreas de transição como espaços de trabalho.	28
Figura 2. Esquema de circulação de vento na atmosfera.	37
Figura 3. Perfis do vento em diferentes terrenos.....	38
Figura 4. Esquema em planta das três zonas formadas no escoamento do vento em torno de um obstáculo não aerodinâmico.....	39
Figura 5. Velocidade de vento e pressões de vento induzidas são reduzidas no ambiente urbano.	40
Figura 6. Pressões relativas referentes às forças motrizes do movimento de ar.	44
Figura 7. Pressões de vento agindo no edifício.....	45
Figura 8. Campos de pressão em um cubo e em um corpo aerodinâmico.	46
Figura 9. Distribuição de C_p na fachada de um edifício.	46
Figura 10. Esquema demonstrando os gradientes de pressão.	48
Figura 11. Esquema demonstrando a ventilação natural unilateral com uma única.....	51
Figura 12. Esquema demonstrando a ventilação natural cruzada e a proporção ideal de profundidade de planta em função do pé-direito.....	52
Figura 13. Corte esquemático demonstrando a distribuição das pressões de vento em um prédio com pátio central.	52
Figura 14. Quatro formas genéricas de átrios: (a) centralizado, (b) semifechado, © anexo, (d) linear.....	53
Figura 15. Padrões de ventilação em átrios, baseados na literatura.	54
Figura 16. Pressão estática por efeito chaminé como força motriz da ventilação natural. (a) Pressão associada a ventilação natural por efeito chaminé em átrio central. (b) Variação da pressão estática em função da diferença de temperatura e altura da edificação.	55
Figura 17. Taxas similares de aceitação para diferentes ambientes térmicos internos em edifícios com AVAC e naturalmente ventilados em Singapura.	59

Figura 18. A zona neutra é estendida por meio das oportunidades adaptativas.	61
Figura 19. Vista externa do edifício.	65
Figura 20. Clima de Frankfurt.	66
Figura 21. Planta tipo com separação das zonas de trabalho.	67
Figura 22. Vista dos escritórios voltados para os terraços laterais.	68
Figura 23. Corte demonstrando a separação das “vilas” de 12 pavimentos. ...	70
Figura 24. Foto demonstrando o fechamento de vidro nos átrios separando as “vilas” de 12 pavimentos.	70
Figura 25. Fotos e detalhes da fachada dupla.	71
Figura 26. Localização dos pontos de medição de temperatura no interior da terceira “vila de escritórios”, incluindo um ponto no primeiro terraço da vila (voltado para o nordeste), dois pontos no átrio (sul e noroeste) e um ponto em três escritórios diferentes.	72
Figura 27. Localização de três dos data loggers de medição, com uma indicação no terraço, uma no átrio e uma em um dos escritórios.	73
Figura 28. Gráfico de temperaturas do ar registradas nos dois dias de medição, no terraço, no átrio e nos escritórios.	74
Figura 29. Desenho esquemático da terceira “vila de escritórios”, com a indicação de medições da velocidade do vento em diferentes pontos. O esquema mostra o fechamento da abertura do terraço voltado para o vento predominante.	75
Figura 30. Foto aérea do edifício 30th St. Mary Axe.	77
Figura 31. Gráfico demonstrando a temperatura média anual em Londres.	78
Figura 32. Perspectiva e planta de uma das “vilas” de seis pavimentos, modelada para a avaliação da eficiência da ventilação natural, por meio de simulação computacional de dinâmica de fluidos. A variação de cores corresponde a diferenças no coeficiente de pressão ao longo das paredes internas, estando os valores positivos relacionados à entrada de ar pela parte inferior do átrio de seis pavimentos, e os valores negativos relacionados à saída de ar pela parte superior do átrio.	80
Figura 33. Vista da fachada demonstrando as janelas do átrio abertas.	81
Figura 34. Planta tipo layout.	82
Figura 35. Foto externa do edifício.	86

Figura 36. Gráfico demonstrando as temperaturas máximas e mínimas anuais.	88
Figura 37. Gráfico demonstrando a precipitação anual. Fonte:	88
Figura 38. Rosa dos Ventos demonstrando a direção e a intensidade dos ventos predominantes.	89
Figura 39. Imagem aérea demarcando a localização do edifício em seu entorno imediato.	89
Figura 40. Planta do pavimento tipo.	91
Figura 41. Foto do vazio central.	91
Figura 42. Foto das portas de vidro de correr e da fachada externa vista dos escritórios.	93
Figura 43. Corte esquemático demonstrando uma hipótese do funcionamento da ventilação natural.	93
Figura 44. Modelo desenvolvido para simulações térmicas e definição de zonas para as áreas de trabalho.	94
Figura 45. Planilha de inserção de dados de ocupação.	95
Figura 46. Simulação térmica para um dia com temperaturas altas de verão (11 de abril). Temperatura externa: bulbo seco. Caso-base e cenários: temperaturas resultantes.	97
Figura 47. Corte esquemático demonstrando a posição dos data loggers.	99
Figura 48. Planta baixa demonstrando a localização do data logger na varanda do 5º pavimento. A figura também apresenta duas fotos tiradas no local.	100
Figura 49. Planta baixa demonstrando a localização do data logger na varanda do 12º pavimento. A figura também apresenta duas fotos tiradas no local.	100
Figura 50. Planta baixa demonstrando a localização do data logger na recepção do escritório do 5º pavimento. A figura também apresenta duas fotos tiradas no local.	102
Figura 51. Planta baixa demonstrando a localização do data logger na sala de reunião do escritório do 5º pavimento. A figura também apresenta três fotos tiradas no local.	102
Figura 52. Planta baixa demonstrando a localização do data logger no escritório do 12º pavimento. A figura também apresenta duas fotos tiradas no local.	103

Figura 53. Planta baixa demonstrando a localização do data logger no espaço multiuso do 13º pavimento. A figura também apresenta três fotos tiradas no local.....	104
Figura 54. Gráfico com medições de temperatura e umidade relativa do ar, realizadas entre os dias 5/3/2019 e 10/3/2019. Neste gráfico foram retratadas apenas as medições externas, realizadas nos terraços do 5º e do 12º pavimentos.....	105
Figura 55. Gráfico com medições de temperatura do ar, realizadas entre os dias 5/3/2019 e 11/3/2019. Neste gráfico foram retratadas as medições realizadas nos escritórios do 5º, 12º e 13º pavimentos.....	106
Figura 56. Foto do escritório do pavimento térreo.....	108
Figura 57. Foto do escritório do pavimento térreo.....	109
Figura 58. Foto da varanda do 2º pavimento, demonstrando um espaço sem mobiliário e sem ocupação. Fonte: Autor desta tese.....	110
Figura 59. Temperaturas médias diárias em todos os meses do ano.	115
Figura 60. Umidade relativa ao longo do ano.....	116
Figura 61. Aceitabilidade em relação ao movimento de ar, em resposta a diferentes temperaturas operativas.	117
Figura 62. Rosa dos ventos para São Paulo.....	117
Figura 63. Vista externa da fachada norte.	119
Figura 64. Vista interna do átrio central.....	120
Figura 65. Planta do pavimento tipo.....	121
Figura 66. Corte demonstrando onde foram instalados os data loggers.	122
Figura 67. Corte demonstrando as medições de luz natural.	123
Figura 68. Simulação de iluminação natural para o quarto pavimento, considerando o cenário existente, no qual é utilizado o vidro refletivo. Simulação às 15h no mês de abril. Condições de céu encoberto.	124
Figura 69. Simulação de iluminação natural para o quarto pavimento, considerando um cenário com vidro incolor. Simulação às 15h no mês de abril. Condições de céu encoberto.....	125
Figura 70. Corte. Simulação de iluminação natural, considerando um cenário com vidro incolor. Simulação às 15h no mês de abril. Condições de céu encoberto.	126

Figura 71. Medições dos data loggers demonstrando as temperaturas externa e interna.	128
Figura 72. Foto interna demonstrando o layout open plan no quarto pavimento.	129
Figura 73. Simulação de CFD demonstrando velocidades elevadas de vento nas áreas adjacentes às janelas.	129
Figura 74. Foto da cobertura do átrio central, demonstrando a ausência de aberturas de ventilação para saída do ar.	131
Figura 75. Média da radiação horizontal direta e difusa na cidade de São Paulo. Os dados de radiação foram extraídos do banco de dados do programa Meteororm 6.1.	132
Figura 76. Carta solar para fachada norte, gráfico de barras com a variação dos ganhos solares (absorvidos e transmitidos pela fachada) em três cenários de WWR, gráfico de linhas com a variação de temperaturas nos modelos simulados em cada uma das três configurações de fachada testadas e simulação de iluminação natural para o cenário de melhor desempenho térmico.	136
Figura 77. Carta solar para fachada sul, gráfico de barras com a variação dos ganhos solares (absorvidos e transmitidos pela fachada) em três cenários de WWR, gráfico de linhas com a variação de temperaturas nos modelos simulados em cada uma das três configurações de fachada testadas e simulação de iluminação natural para o cenário de melhor desempenho térmico.	138
Figura 78. Carta solar para fachada leste, gráfico de barras com a variação dos ganhos solares (absorvidos e transmitidos pela fachada) em três cenários de WWR, gráfico de linhas com a variação de temperaturas nos modelos simulados em cada uma das três configurações de fachada testadas e simulação de iluminação natural para o cenário de melhor desempenho térmico.	140
Figura 79. Carta solar para fachada oeste, gráfico de barras com a variação dos ganhos solares (absorvidos e transmitidos pela fachada) em três cenários de WWR, gráfico de linhas com a variação de temperaturas nos modelos simulados em cada uma das três configurações de fachada testadas e	

simulação de iluminação natural para o cenário de melhor desempenho térmico.	142
Figura 80. Fluxograma com as etapas dos estudos analíticos.....	147
Figura 81. Planta baixa. Caso-base com planta quadrada.....	150
Figura 82. Planta baixa. Caso-base com planta retangular.....	151
Figura 83. Edifício de planta quadrada com átrios periféricos.....	155
Figura 84. Edifício de planta retangular com átrios periféricos.....	156
Figura 85. Edifício de planta quadrada com átrios adjacentes ao núcleo.	157
Figura 86. Edifício de planta retangular com átrios adjacentes ao núcleo.	158
Figura 87. Edifício de planta quadrada com átrios centrais.....	159
Figura 88. Edifício de planta retangular com átrios centrais.....	160
Figura 89. Cenários de análise para o caso-base de planta quadrada. As tipologias de átrios aplicadas nos cenários seguem as numerações: 1. Cenários com átrios periféricos. 2. Cenários com átrios adjacentes ao núcleo. 3. Cenários com átrios centrais. Nos pavimentos de entrada e saída de ar (pavimentos mais baixos e mais altos respectivamente), foram criados jardins e varandas permitindo que o ar externo chegue até os vazios, que nos casos dos átrios adjacentes ao núcleo e átrios centrais, se encontram no interior da planta.	164
Figura 90. Cenários de análise para o caso-base de planta quadrada. As tipologias de átrios aplicadas nos cenários seguem as numerações: 1. Cenários com átrios periféricos. 2. Cenários com átrios adjacentes ao núcleo. 3. Cenários com átrios centrais. Nos pavimentos de entrada e saída de ar (pavimentos mais baixos e mais altos respectivamente), foram criados jardins e varandas permitindo que o ar externo chegue até os vazios, que nos casos dos átrios adjacentes ao núcleo e átrios centrais, se encontram no interior da planta.	165
Figura 91. Modelo extraído do software TAS. Pavimentos coloridos indicam as áreas que receberam aplicação de zonas.....	167
Figura 92. Planta demonstrando os limites da zona térmica dos escritórios. .	167
Figura 93. Corte do caso-base com átrio de 12 pavimentos adjacente ao núcleo.....	168
Figura 94. Planta dos pavimentos de entrada e saída de ar no cenário com átrio adjacente ao núcleo.	169

Figura 95. Planta dos pavimentos de entrada e saída de ar no cenário propositivo de átrio central.	169
Figura 96. Perspectiva da proteção solar horizontal aplicada na fachada norte. Na janela à direita a proteção solar tem as mesmas dimensões inseridas na ferramenta Feature Shades e à esquerda uma proposta arquitetônica de dividir a proteção em três beirais, que mantêm a mesma projeção de sombreamento.	172
Figura 97. Perspectiva da proteção solar vertical aplicada na fachada sul com as mesmas dimensões aplicadas na ferramenta Feature Shades.	172
Figura 98. Perspectiva da proteção solar horizontal aplicada na fachada leste. Na janela à direita a proteção solar tem as mesmas dimensões inseridas na ferramenta Feature Shades e à esquerda uma proposta arquitetônica de dividir a proteção em três beirais, que mantêm a mesma projeção de sombreamento.	173
Figura 99. Perspectiva da proteção solar vertical aplicada na fachada leste com as mesmas dimensões aplicadas na ferramenta Feature Shades.	174
Figura 100. Perspectiva da proteção solar horizontal aplicada na fachada oeste. Na janela à direita a proteção solar tem as mesmas dimensões inseridas na ferramenta Feature Shades e à esquerda uma proposta arquitetônica de dividir a proteção em três beirais, que mantêm a mesma projeção de sombreamento.	175
Figura 101. Perspectiva da proteção solar vertical aplicada na fachada oeste. Na janela à direita a proteção solar tem as mesmas dimensões inseridas na ferramenta Feature Shades e à esquerda uma proposta arquitetônica de dividir a proteção em oito brises, que mantêm a mesma projeção de sombreamento.	175
Figura 102. Elevação e corte demonstrando um projeto de janelas Maxim-ar com três alturas de abertura.....	176
Figura 103. Foto de uma fachada na qual foram aplicadas janelas Maxim-ar com três alturas de abertura.....	177
Figura 104. Elevação e corte demonstrando o projeto de uma janela pivotante vertical.	178

Figura 105. Exemplo de imagem extraída do recurso visualização 3D do software EDSL TAS. Cenário: átrio periférico com 12 pavimentos. Sheltered e com sombreamento.....	186
Figura 106. Vista axonométrica da tipologia de átrios periféricos demonstrando de forma esquemática a interligação do sistema de ventilação dos pavimentos por intermédio dos átrios.	194
Figura 107. Gráfico de linhas demonstrando a variação de temperatura ao longo de uma semana com temperaturas elevadas de verão para o cenário: átrios periféricos grandes com 12 pavimentos.	202
Figura 108. Gráfico de linhas demonstrando a variação de temperatura ao longo de uma semana com temperaturas elevadas de verão para o cenário: átrios grandes adjacentes ao núcleo com 12 pavimentos.	208
Figura 109. Vista axonométrica da tipologia de átrios centrais (cenário propositivo) demonstrando que os núcleos internos acabam bloqueando a ventilação natural interna em algumas áreas da planta.	214
Figura 110. Vista axonométrica da tipologia de átrios adjacentes ao núcleo demonstrando de forma esquemática que a profundidade da planta foi reduzida e que todas as áreas da planta têm a possibilidade de ventilação cruzada....	214
Figura 111. Posição dos núcleos de serviço, com relação aos átrios internos.	232
Figura 112. Perspectiva do edifício de planta quadrada com átrios adjacentes ao núcleo. A imagem apresenta as fachadas sul (à esquerda) e leste (à direita).	249
Figura 113. Perspectiva do edifício de planta quadrada com átrios adjacentes ao núcleo. A imagem apresenta as fachadas norte (à esquerda) e oeste (à direita).	250
Figura 114. Perspectiva do edifício de planta quadrada com átrio central e núcleos nas laterais. A imagem apresenta as fachadas sul (à esquerda) e leste (à direita).	251
Figura 115. Perspectiva do edifício de planta quadrada com átrio central e núcleos nas laterais. A imagem apresenta as fachadas norte (à esquerda) e oeste (à direita).	252
Figura 116. Perspectiva do edifício de planta quadrada com átrios periféricos. A imagem apresenta as fachadas sul (à esquerda) e leste (à direita).	2543

Figura 117. Perspectiva do edifício de planta quadrada com átrios periféricos. A imagem apresenta as fachadas norte (à esquerda) e oeste (à direita). 2554

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Taxas mínimas de ventilação para diferentes funções da ventilação.	42
Tabela 2. Horas anuais de superaquecimento e taxas médias de ventilação.	96
Tabela 3. Valores de referência para ganhos internos de calor em escritórios.	152
Tabela 4. Caso-base e sombreamento.	188
Tabela 5. Átrios periféricos grandes de 12 pavimentos: comparação wind x Sheltered.	190
Tabela 6. Átrios periféricos com 12 pavimentos.	196
Tabela 7. Átrios periféricos com 6 pavimentos.	197
Tabela 8. Horas de superaquecimento por mês para o cenário com átrios periféricos grandes de 12 pavimentos (pavimento mais baixo).	200
Tabela 9. Átrios adjacentes ao núcleo com 12 pavimentos.	204
Tabela 10. Átrios adjacentes ao núcleo com 6 pavimentos.	205
Tabela 11. Horas de superaquecimento por mês para o cenário com átrios grandes adjacentes ao núcleo com 12 pavimentos (pavimento mais baixo).	207
Tabela 12. Átrio central com 12 pavimentos.	210
Tabela 13. Átrio central com 6 pavimentos.	211
Tabela 14. Caso-base nas orientações norte-sul e leste-oeste (sem vento externo).	216
Tabela 15. Átrios periféricos com 12 pavimentos.	218
Tabela 16. Átrios periféricos com 6 pavimentos.	219
Tabela 17. Horas de superaquecimento por mês para o cenário com átrios periféricos grandes de 12 pavimentos (pavimento mais baixo).	222
Tabela 18. Átrios adjacentes ao núcleo com 12 pavimentos.	224
Tabela 19. Átrios adjacentes ao núcleo com 6 pavimentos.	225
Tabela 20. Horas de superaquecimento por mês para o cenário com átrios grandes adjacentes ao núcleo com 12 pavimentos (pavimento mais baixo).	227
Tabela 21. Átrios centrais com 12 pavimentos.	229
Tabela 22. Átrios centrais com 6 pavimentos.	230

Tabela 23. Horas de superaquecimento por mês para o cenário com átrios grandes centrais ao núcleo com 12 pavimentos (pavimento mais baixo). 233

Tabela 24. Classificação de desempenho térmico comparando os 36 cenários simulados; as cores azul, verde e laranja representam as seguintes tipologias de átrios (respectivamente): átrio adjacente ao núcleo, átrio central e átrio periférico..... 234

SUMÁRIO

Introdução	22
COLOCAÇÃO DO PROBLEMA	24
HIPÓTESE DA PESQUISA	32
METODOLOGIA GERAL DA PESQUISA	32
 CAPÍTULO 1. REVISÃO DE LITERATURA: fundamentos e aplicações da ventilação natural e do conforto térmico	36
1.1 VENTILAÇÃO NATURAL: macroescala – princípios físicos do movimento de ar	36
1.2 VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES: <i>fenômenos físicos</i>	41
1.3 ESTRATÉGIAS E APLICAÇÕES DA VENTILAÇÃO NATURAL	49
1.4 CONFORTO TÉRMICO: PMV e modelo adaptativo	56
 CAPÍTULO 2. ANÁLISE TÉCNICA DE PRECEDENTES: edifício sede do Commerzbank, em Frankfurt, e edifício 30th St. Mary Axe, em Londres	64
2.1 SEDE DO BANCO COMMERZBANK	64
2.2 EDIFÍCIO 30 th ST. MARY AXE	76
 CAPÍTULO 3. PESQUISA DE CAMPO: o caso do edifício Torre Cube em Guadalajara, México	86
3.1 CLIMA DE GUADALAJARA – MÉXICO	87
3.2 LOCALIZAÇÃO DO EDIFÍCIO	89
3.3 CONCEITO ARQUITETÔNICO DO EDIFÍCIO	90
3.4 DESEMPENHO AMBIENTAL DO EDIFÍCIO	92
3.5 SIMULAÇÕES TÉRMICAS	94
3.6 PESQUISA DE CAMPO	98
 CAPÍTULO 4. CONTEXTO CLIMÁTICO: o clima da cidade de São Paulo e o impacto do sombreamento de fachadas	114
4.1 CONTEXTO CLIMÁTICO	114
4.2 PESQUISA DE CAMPO: Prefeitura de Jundiaí-SP	118
4.3 ESTUDOS ANALÍTICOS PARA ESTRATÉGIAS DE SOMBREAMENTO DE FACHADAS EM SÃO PAULO	131

CAPÍTULO 5. MÉTODO DA PESQUISA	146
5.1 CASO-BASE.....	148
5.2 PARÂMETROS DE OCUPAÇÃO.....	151
5.3 CENÁRIOS ALTERNATIVOS	153
5.4 ETAPAS DAS SIMULAÇÕES DE TERMODINÂMICA	166
5.5 CRITÉRIOS DE ANÁLISES DE RESULTADOS.....	179
 CAPÍTULO 6. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS: resultados e recomendações de projeto	 185
6.1 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS: edifício com planta quadrada	187
6.2 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS: <i>edifício com planta retangular</i>	215
6.3 CLASSIFICAÇÃO GERAL DE DESEMPENHO: <i>térmica e ventilação</i>	234
 Considerações Finais	 240
SÍNTESE DOS CAPÍTULOS.....	241
COMPROVAÇÃO DA TESE	247
APLICAÇÃO ARQUITETÔNICA DA PESQUISA.....	248
LIMITAÇÕES DO TRABALHO E DESDOBRAMENTOS FUTUROS	256
 Referências Bibliográficas	 258

Introdução

COLOCAÇÃO DO PROBLEMA

O desenvolvimento de tecnologias e sistemas prediais no século passado, como a invenção do ar-condicionado por Will Carrier em 1928 e da lâmpada fluorescente em 1938, exerceu uma grande influência na abordagem metodológica de projetos para edifícios de escritório e ambientes de trabalho. Nesse contexto, um estilo universal de arquitetura surgiu, com o qual as novas edificações poderiam estar completamente desconectadas do clima, dependendo dos sistemas de iluminação e condicionamento artificiais durante todo o ano para alcançar o conforto dos usuários. Desde então o processo de projetos para edifícios de escritório está mais focado nas soluções plásticas arquitetônicas (de forma e materialidade), desprezando na maior parte dos casos os aspectos técnicos projetuais específicos para os diferentes climas.

A estética das fachadas envidraçadas (sem a presença de sombreamento externo) e a verticalidade dos edifícios comerciais têm um efeito significativo na criação de marcos arquitetônicos nas cidades, transmitindo uma imagem de avanço tecnológico e prestígio. Entretanto, sob o ponto de vista de desempenho ambiental, o benefício das vistas externas abundantes e da alta incidência de luz natural no perímetro dos pavimentos se torna irrelevante, quando são consideradas outras questões resultantes dessas soluções arquitetônicas, como, por exemplo, o superaquecimento, que no caso de edifícios condicionados artificialmente resulta em aumento da demanda energética para resfriamento; e também o ofuscamento, em decorrência da incidência de luz do sol direta nas estações de trabalho, aumentando a necessidade do uso de persianas e tornando assim indispensável o uso de iluminação artificial. Tais tendências arquitetônicas contribuem para o aumento da demanda energética do setor de edificações, que atualmente representa aproximadamente 25% do consumo de energia primária global, sendo assim responsável por 33% das emissões globais de CO₂. É importante ressaltar também que 60% do consumo mundial de eletricidade é destinado a edifícios comerciais e residências (BARKER et al., 2007).

É sabido que não é possível determinar o desempenho ambiental de um edifício somente por meio da análise do seu consumo energético. É necessário avaliar também se a origem da energia primária está ligada a emissões de carbono. No Brasil

a maior parte da geração de energia se dá por intermédio das hidrelétricas, que, como se sabe, não contribuem diretamente para emissões de carbono. No entanto o Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional (EPE, 2015) demonstrou que a participação de fontes renováveis de energia na matriz brasileira se reduziu de 88,7% em 2011 para 65,2% em 2014. Este fato se deve fundamentalmente à redução no regime de chuvas durante esses anos, o que resultou em uma contração no volume de água armazenado nos reservatórios, afetando a capacidade de produção de energia das hidrelétricas. Esse período de seca excessiva entre os anos de 2011 e 2014 demonstra a fragilidade deste sistema, principalmente no cenário atual de mudança climática, no qual eventos climáticos extremos podem ocorrer com mais frequência.

Outro fator a ser questionado é que normalmente a operação das hidrelétricas não está diretamente associada a emissões de carbono, no entanto o processo de construção das hidrelétricas demanda uma alta energia incorporada, resultante do grande volume de materiais empregados, como cimento e aço. Ademais, devem ser levadas em consideração também outras formas de impacto ambiental ocasionadas por esta matriz de geração de energia, como, por exemplo, a inundação de áreas de floresta nativa.

Diante deste cenário e levando em consideração as previsões que apontam um crescimento de 80% no consumo energético brasileiro até o ano de 2035 (EPE, 2014-1), evidencia-se a urgente necessidade de redução da demanda de energia no setor de edificações, que é responsável por significativa parcela do consumo energético brasileiro. Dessa forma, a eficiência energética passa a ser fundamental para um crescimento mais sustentável, sendo uma importante medida de mitigação das emissões de CO₂ e dos efeitos da mudança climática.

Mais específico ao contexto dos ambientes de escritório, o condicionamento de ar representa aproximadamente 47% do total de energia elétrica consumida em edifícios comerciais no Brasil, seguido pela iluminação artificial, com 22% do total (PROCEL, 2007). Esta proporção se torna ainda mais relevante na cidade de São Paulo, que abriga a maior quantidade e concentração de edifícios de escritório de todo o país. Estes dados demonstram a necessidade de se realizar uma revisão crítica a respeito do modelo de edifícios que vem sendo desenvolvido e aplicado nas últimas

décadas, buscando encontrar soluções para uma abordagem mais direcionada à melhoria do desempenho e da qualidade ambientais.

Os típicos edifícios de escritório que vêm sendo construídos na cidade de São Paulo desde a década passada têm como características predominantes a planta profunda nos formatos retangulares e quadrados, com núcleo central e com a laje do pavimento tipo variando entre 700 m² e 2.000 m². Na maior parte dos casos esses edifícios não contam com dispositivos de proteção solar externos e as fachadas apresentam predominância de áreas envidraçadas, compostas por vidros refletivos ou Low E, que dispõem de um fator de transmitância luminosa muito baixo, quando comparados ao vidro incolor. Assim, a maior parte dessas edificações opera durante 100% das horas de ocupação dependendo de climatização e iluminação artificiais. Em contrapartida, vêm sendo realizados estudos (MARCONDES, 2010; COTTA 2012) os quais demonstram que, por meio da implantação de conceitos bioclimáticos na arquitetura, é possível que tais edifícios venham a operar de forma passiva. Obviamente isso implica também uma mudança paradigmática da noção de conforto ambiental, com foco especial no conforto térmico e na forma como as pessoas interagem com os ambientes de trabalho.

É importante ressaltar que os escritórios e espaços de trabalho em todo o mundo vêm passando por um processo profundo de mudança de conceitos e padrões de trabalho, os quais refletem diretamente na forma como as pessoas utilizam os espaços.

No início da década de 80 a tipologia mais utilizada de escritórios baseava-se no conceito de layout de salas individuais e fechadas. Nos anos subsequentes essa tipologia evoluiu para os “cubículos” de trabalho que consistiam em mesas individuais com divisórias altas, a fim de atender uma demanda de privacidade para a execução de tarefas diárias. Durante a década de 90 e início de 2000, o layout *open plan* passou a ser uma nova tendência para organização espacial de escritórios em todo o mundo, permitindo uma maior densidade de ocupação em razão das características físicas do mobiliário e do design das estações de trabalho.

A partir dos anos 2000 até os dias atuais, a natureza do trabalho evoluiu drasticamente como reflexo das mudanças no cenário da economia global. No século passado as empresas com maior valor econômico eram ligadas ao segmento do

petróleo, no entanto neste novo século a informação digital, as ideias e o conhecimento tecnológico dirigem a economia (THE ECONOMIST, 2017). O fato de as empresas Google, Amazon, Apple, Facebook e Microsoft terem o maior valor de mercado no ano de 2017, todas ligadas ao segmento de tecnologia, é uma demonstração disso.

De acordo com o *The Economist* (2017), pertencemos à uma nova era da economia na qual o tipo de trabalho desenvolvido em escritórios destoa significativamente do modelo convencional do escritório modernista originado a partir da metodologia produtiva da indústria, pela qual a maior parte das pessoas desenvolvia tarefas repetitivas e de processo linear. Na era em que o conhecimento e as pessoas se tornaram o recurso mais importante, o trabalho está muito mais voltado para o desenvolvimento da criatividade, a busca da inovação e a troca de conhecimento (conhecido em inglês como “knowledge work”).

Neste modelo, em vez de os colaboradores sentarem-se em fileiras de mesas para seguir instruções explícitas dentro de uma hierarquia, novas práticas de trabalho estão surgindo baseadas em colaboração, iniciativa e criatividade. Assim os ambientes de trabalho estão sendo moldados para atender estas demandas, proporcionando maior flexibilidade nos postos de trabalho, e em muitos casos os colaboradores não têm mais uma estação de trabalho fixa e podem escolher o local que melhor atenda suas necessidades de conforto e satisfação. Com esta finalidade, vem sendo incorporada também, no projeto de novos escritórios, uma diversidade de espaços colaborativos, de *brainstorm* e de relaxamento (*chill-out spaces*), possibilitando maior interação entre equipes.

Assim, ambientes como varandas, jardins, átrios e vazios arquitetônicos passam a ter um valor qualitativo de grande importância para os edifícios de escritório, compondo este novo universo de espaços diversificados e flexíveis, que fazem a transição entre o interior e o exterior do edifício, proporcionando ao usuário novas experiências sensoriais no nível de conforto térmico e luminoso, e que podem contribuir para o aumento de produtividade (CLEMENTS-CROOME, 2006).



Figura 1. Sede do banco Commerzbank em Frankfurt – Alemanha: a vista dos sky gardens demonstra a possibilidade de utilização de áreas de transição como espaços de trabalho.

Fonte: Wood e Salib (2013).

O processo de projeto para edifícios de escritório deve buscar um aperfeiçoamento na conexão entre o clima local (no caso São Paulo) e os espaços de trabalho, com ênfase na experiência do usuário. Para isso é necessário adotar parâmetros arquitetônicos que possibilitem uma melhoria qualitativa nos ambientes, mas que também possam apresentar ganhos significativos em eficiência energética, que, quando quantificados, podem servir como marco de referência (*benchmark*) para a nova geração de edifícios.

No contexto desta abordagem bioclimática de projeto, a presença de átrios, vazios e varandas é de suma importância para garantir a eficácia de conceitos como

a iluminação e a ventilação naturais, pois aumentam a proporção de áreas de fachada por área de ocupação em planta, o que a princípio já proporciona uma melhor qualidade ambiental ao espaço de trabalho. Para a definição da profundidade da planta recomenda-se aplicar como ponto de partida a proporção de duas vezes a altura do pé-direito do ambiente (BAKER; STEEMERS, 2002), definindo assim a zona passiva de iluminação e ventilação.

É necessário também um projeto adequado do sistema de sombreamento, que necessita ser customizado para cada orientação de acordo com os ângulos de incidência solar de forma a bloquear toda a luz solar direta (sunlight), permitindo apenas o acesso à luz difusa (daylight) proveniente da claridade do céu, que, além de apresentar o potencial de substituir a iluminação artificial em parâmetros numéricos (lux), ainda pode ser uma importante medida para aumento de produtividade (KEIGHLEY, 1973), reduzindo também os efeitos da Síndrome dos Edifícios Doentes (Sick Building Syndrome) sobre os ocupantes. É importante ressaltar que Baker e Steemeer (2002) constataram, em estudos de campo, que os usuários de edifícios de escritório apresentam uma alta insatisfação com a luz solar direta, no entanto aceitam uma ampla faixa de luz natural difusa que pode se estender dentro dos limites de 150 lux (para tarefas com utilização de monitores) até 2.000 lux (acima deste valor o nível de insatisfação aumenta, resultando em maior frequência de utilização das persianas).

Além da iluminação natural, outra estratégia bioclimática da arquitetura a ser aplicada, após a definição da profundidade adequada de planta e de um projeto apropriado para os dispositivos de sombreamento, é a utilização de ventilação natural, cuja aplicabilidade em edifícios de escritório ainda se apresenta como um desafio, muitas vezes não do ponto de vista técnico (pois já existem estudos de casos em edifícios reais que comprovam a viabilidade desta estratégia mesmo em climas quentes), mas do ponto de vista cultural, em decorrência da imagem de prestígio que está associada à climatização artificial (GONÇALVES; BODE, 2015).

Mais especificamente para a cidade de São Paulo, estudos embasados em simulações térmicas (MARCONDES, 2010; COTTA, 2012) demonstram que é possível alcançar a independência dos sistemas artificiais de climatização e iluminação por no mínimo 80% das horas ocupadas no ano, utilizando métodos passivos de resfriamento como a aplicação de massa térmica (lajes de concreto aparente).

A estratégia de utilização da massa térmica deve ser aliada à ventilação noturna, pois dessa forma toda a energia na forma de calor emitida dentro do escritório durante o dia acaba sendo absorvida pela laje de concreto e durante a noite esse calor é dissipado e a laje é resfriada, tendo um impacto significativo não só na redução da temperatura do ar do ambiente de trabalho durante o dia, como também proporcionando uma temperatura radiante de superfície mais baixa principalmente nas primeiras horas da manhã. É importante ressaltar também que estas estratégias podem ser aplicadas em edifícios de modo misto, e têm se apresentado como uma importante alternativa para maior confiabilidade do mercado, de forma que os sistemas ativos estão à disposição para atender as variações e os efeitos climáticos mais extremos. Conforme mencionado por Gonçalves e Bode (2015), o valor da estratégia de modo misto vai além dos ganhos em economia de energia, e se estende até a criação de um modelo que se apresenta como uma alternativa ao edifício hermeticamente fechado com fachada em pele de vidro, uma vez que ele já inclui, no sistema de esquadrias, janelas que podem ser abertas.

Outro aspecto de suma importância para redução do consumo energético no setor de edificações é que as estratégias de projeto supracitadas não se restringem a edifícios novos, podendo ser aplicadas em prédios existentes na forma de requalificação ambiental, aumentando assim o desempenho energético, a qualidade espacial e o valor de mercado desses edifícios.

No Brasil, em razão do acentuado crescimento econômico na década passada, houve um excesso de ofertas de lajes corporativas em edifícios comerciais, sendo este desproporcional à real demanda de mercado, conseqüentemente elevando a taxa de vacância, que se agravou ainda mais com o cenário de recessão econômica recente.

Na cidade de São Paulo (onde se encontra a maior concentração de edifícios comerciais do país), a taxa de vacância para escritórios de alto padrão (em edifícios novos) registrou o patamar de 23,6% no último trimestre de 2015 (JLL, 2016). Este valor se torna ainda mais expressivo quando considerada também a vacância nos imóveis construídos nas décadas passadas, que não se configuram entre os imóveis de maior procura do mercado, em razão de diversos fatores, entre eles a localização, dimensões de laje tipo, linguagem arquitetônica ultrapassada conforme os padrões

estabelecidos pelo mercado, estado de conservação, etc. Neste contexto, levando em consideração que existe uma alta energia incorporada no processo de construção de novos edifícios, a requalificação de edifícios existentes apresenta-se como uma alternativa eficaz para atender as demandas futuras e em paralelo alcançar as metas estabelecidas pelo Plano Nacional de Energia de reduzir em 37% as emissões projetadas de gases de efeito estufa até 2025 (EPE, 2020). Ademais vale ressaltar que a vantagem da reabilitação de edifícios está ligada ao fato de a maior parte da energia incorporada residir na estrutura, podendo representar um ganho expressivo na minimização das emissões de carbono, visto que, por conta da sua durabilidade, constitui a parte do edifício que é mantida em uma requalificação (BAKER, 2009).

Esta pesquisa dá continuidade aos trabalhos desenvolvidos durante o Mestrado, realizado na instituição Architectural Association School of Architecture, em Londres na Inglaterra, cuja tese foi validada pelo Departamento de Tecnologia da Arquitetura da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo (nº de registro: 121261).

A pesquisa de Mestrado intitulada “The Impact of Window Design on the Environmental Performance of Work Environments in São Paulo” (O Impacto do Projeto de Janelas no Desempenho Ambiental dos Espaços de Trabalho em São Paulo) investigou como o elemento janela e sua distribuição na envoltória da edificação podem impactar diretamente no desempenho energético dos ambientes de trabalho, assim como no conforto térmico e visual dos usuários, podendo, por meio de um projeto apropriado, melhorar significativamente os aspectos qualitativos espaciais e resultar em uma redução energética efetiva. O processo de desenvolvimento da pesquisa utilizou a metodologia de criar um modelo (de espaço de trabalho) utilizando dimensões de profundidade de planta que respeitassem a zona passiva de iluminação e ventilação. Com base neste modelo, foram conduzidas simulações térmicas, de iluminação e de dinâmica de fluidos em softwares especializados, que permitiram analisar em detalhes como os elementos de sombreamento, juntamente com a disposição das aberturas, afetam a distribuição da luz natural e o fluxo de ar nos ambientes de trabalho.

Na presente pesquisa, a análise do desempenho ambiental dos espaços de trabalho foi retomada, no entanto com foco na utilização de átrios e vazios

arquitetônicos para o aprimoramento das estratégias de ventilação natural por efeito chaminé. O objetivo principal é revisar os parâmetros arquitetônicos da tipologia típica dos edifícios de escritório que vem sendo aplicada pelo mercado de São Paulo desde o ano 2000, apresentando soluções e intervenções de ordem arquitetônica que possam melhorar seu desempenho ambiental.

HIPÓTESE DA PESQUISA

A hipótese desta pesquisa é de que a inserção de átrios e vazios, como proposta de requalificação para os edifícios de escritório construídos em São Paulo desde o ano 2000, pode contribuir significativamente com a ampliação do potencial de ventilação natural e, conseqüentemente, com a redução da demanda energética dessas edificações. Vale ressaltar que existe uma relação entre a altura do edifício e a capacidade de proporcionar movimento de ar por efeito chaminé (por diferença de pressão), fundamentando ainda mais a hipótese apresentada, já que as intervenções estão sendo propostas para edifícios altos.

Ademais, esta pesquisa parte da premissa de que é possível alcançar um desempenho térmico e energético semelhante nos edifícios requalificados e em edifícios novos, com o benefício de que nos edifícios requalificados há uma redução significativa de energia incorporada na construção.

METODOLOGIA GERAL DA PESQUISA

O método empregado nesta pesquisa consiste nas seguintes etapas:

1. Pesquisa bibliográfica dos principais fenômenos físicos que dizem respeito ao movimento de ar, tanto no contexto urbano como na escala dos edifícios. Adicionalmente, a pesquisa também realizou uma revisão dos principais conceitos de conforto térmico, avaliando como o modelo adaptativo pode contribuir com a maior aceitação da ventilação natural, na qualidade de solução para regulação térmica dos usuários em edifícios.

2. Estudos de precedentes que aplicaram de forma bem-sucedida os conceitos físicos da ventilação natural, utilizando átrios para impulsionar o movimento de ar por efeito chaminé. Vale ressaltar que, nesses casos, as formas dos edifícios foram ajustadas, para melhor atender as demandas de ventilação. A análise técnica de precedentes focou em dois edifícios: edifício sede do Commerzbank, em Frankfurt, e edifício 30th St. Mary Axe, em Londres.
3. Pesquisa de campo em edifício de escritório com átrio central, que opera a maior parte do ano utilizando ventilação natural. O edifício está localizado em região com clima que se assemelha ao clima de São Paulo, principalmente no que diz respeito às temperaturas máximas de verão. O edifício analisado na pesquisa de campo é a Torre Cube, localizada na cidade de Guadalajara, México. O objetivo da pesquisa foi extrair o máximo de informações por meio de medições e entrevistas com os usuários, de forma a verificar quais soluções de projeto estão de fato funcionando e com boa aceitação dos usuários, podendo ser utilizadas com diretrizes para os estudos analíticos.
4. Análise do clima de São Paulo e estudos analíticos com o objetivo de verificar qual tipologia de sombreamento pode proporcionar o mais efetivo controle solar, levando em consideração aspectos de iluminação natural, obstrução da radiação solar direta e vistas externas. Esses estudos também forneceram bases para a criação dos modelos computacionais dos estudos analíticos.
5. Definição de procedimentos metodológicos para simulações computacionais incluindo: a construção do caso-base de simulação e seu detalhamento no que tange às características construtivas, ao padrão de ocupação, assim como dos cenários alternativos de teste, seguidos pelas etapas das simulações computacionais e dos critérios para a análise dos resultados.
6. Estudos analíticos com o objetivo de avaliar o desempenho térmico, energético e o potencial de ventilação natural para diversos cenários de átrios e vazios abordados neste estudo. Foram elaboradas recomendações de projeto com base essencialmente nos resultados obtidos nas simulações computacionais.

Capítulo 1

CAPÍTULO 1. REVISÃO DE LITERATURA: fundamentos e aplicações da ventilação natural e do conforto térmico

Este capítulo dará ênfase nas estratégias e nos fundamentos da ventilação natural primeiramente em um contexto macro, abrangendo a escala urbana, e posteriormente em um contexto mais focado nos edifícios de escritório multipavimentos. A pesquisa realiza uma revisão dos principais conceitos físicos que regem a termodinâmica e a aerodinâmica, fazendo citações a equações e algoritmos matemáticos que fazem referência às forças motrizes do movimento de ar e transferência de calor. Entende-se necessário incorporar tais equações na revisão bibliográfica, pois o software que será utilizado nos estudos analíticos da pesquisa se baseia em equações desta natureza para realizar as simulações e sintetizar os resultados. É importante ressaltar que a pesquisa tem um caráter técnico, mas que o objetivo final é explorar qual o impacto das estratégias estudadas na concepção arquitetônica de projeto.

Adicionalmente foi realizada uma revisão dos principais conceitos relacionados às teorias de conforto térmico (equilíbrio de calor e modelo adaptativo), de modo a comparar as limitações e aplicações de cada modelo, visto que todos os resultados dos estudos analíticos serão analisados com base nestes critérios.

1.1 VENTILAÇÃO NATURAL: macroescala – princípios físicos do movimento de ar

A atmosfera terrestre está dividida em quatro camadas: mesosfera, termosfera, estratosfera e troposfera. As correntes de vento ocorrem na camada atmosférica mais baixa, a troposfera. Dentro dessa camada o gradiente vertical de temperatura varia em função da altura, tornando-se mais frio à medida que há um acréscimo de altitude.

A circulação de ar na atmosfera terrestre ocorre em movimentos verticais e horizontais. A circulação vertical é ocasionada pelo aquecimento do ar na zona Equatorial, em decorrência da maior intensidade da radiação solar que atinge essa região da Terra. O ar aquecido se expande e com sua densidade reduzida gera um

movimento de ascensão vertical que resulta na criação de zonas de baixa pressão. As correntes de ar vindas das regiões subtropicais são então deslocadas em direção a essas zonas de baixa pressão, que geram uma circulação horizontal (BITTENCOURT *et al.*, 2010). O ar aquecido sobe até certa altura onde volta a se arrefecer, descendo para a faixa subtropical, que resulta assim na formação de zonas de alta pressão que se propagam nas direções norte e sul, conforme ilustrado na Figura 2.

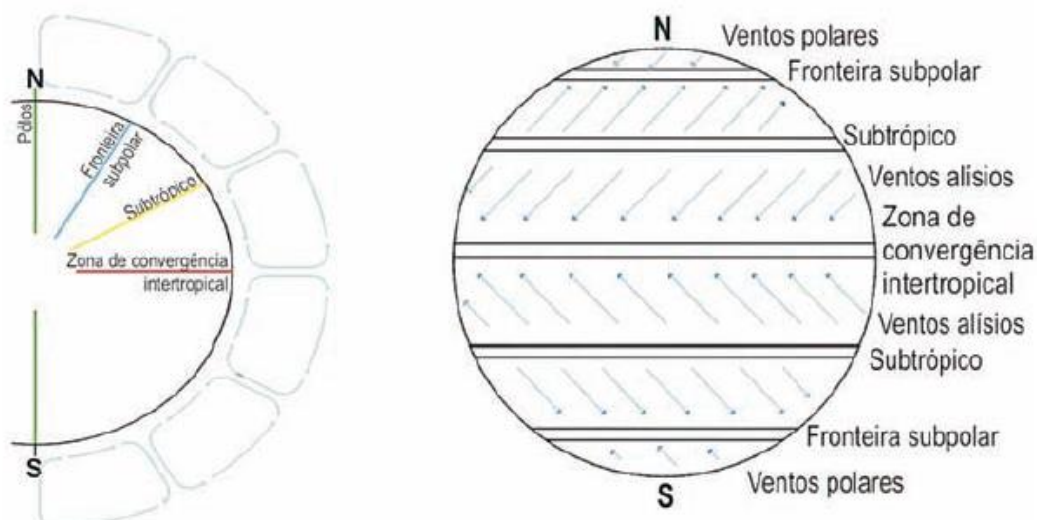


Figura 2. Esquema de circulação de vento na atmosfera.

Fonte: Konigsberger et al. (1974).

O vento é um fenômeno físico altamente variável ao longo do tempo e nunca é estável tanto na intensidade como na direção de incidência (CIBSE, 2005). Por ser um fluido, o ar se mantém próximo da superfície terrestre por ação da gravidade e, quando o vento flui sobre uma superfície, sofre redução de velocidade em função da força de atrito que é imposta pela rugosidade do terreno. A variação vertical do fluxo de ar gera um gradiente da velocidade de vento que tem valor nulo junto ao solo, aumentando conforme o acréscimo de altura, e alcançando o valor máximo na zona livre de influência do atrito com a superfície (BITTENCOURT *et al.*, 2010). Como pode ser verificado na Figura 3, distintos gradientes são produzidos quando o vento atravessa áreas abertas planas, de água por exemplo (com baixa rugosidade), em contraste com as áreas urbanizadas. Desse modo se entende que a velocidade do vento na altura das construções é variável em função do entorno no qual estão inseridas.

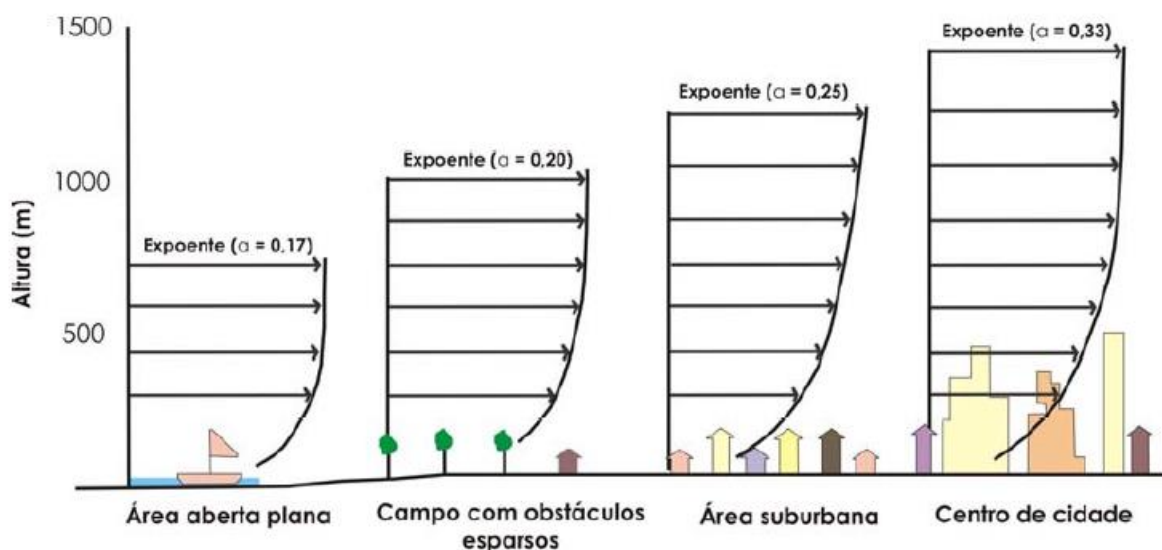


Figura 3. Perfis do vento em diferentes terrenos.
Fonte: Bittencourt et al. (2010).

No que tange aos princípios da aerodinâmica, quando uma corrente de vento se choca com um obstáculo (no caso um edifício), é gerada uma camada limite que pode ter um escoamento laminar ou turbulento (Figura 4). Dependendo da geometria do obstáculo, a camada limite pode estar mais afastada ou mais encostada neste. De acordo com Ghiaus e Allard (2005), os fluxos que ocorrem na natureza e em aplicações de engenharia, em sua maioria, são turbulentos e de fato, nas dinâmicas de fluidos, o fluxo laminar é uma exceção. Seria necessária uma viscosidade muito alta em pequenas dimensões para se encontrar um fluxo laminar. Uma das formas de se ter uma demonstração prática da natureza de um fluxo turbulento é observar como se desenvolve uma fumaça de cigarro em um ambiente fechado. Vale ressaltar que alguns autores (SANTAMOURIS; WOUTERS, 2006; GHIAUS; ALLARD, 2005) consideram o fluxo turbulento como um dos problemas não resolvidos pela física clássica e que, após 100 anos de pesquisa, ainda faltam alguns entendimentos a respeito deste tema. Entretanto as características físicas principais do fluxo turbulento, especialmente no que diz respeito às aplicações na engenharia, já estão bem determinadas; são elas:

- **Irregularidade ou aleatoriedade:** uma das principais características do fluxo turbulento é aleatoriedade em tempo e espaço.

- **Difusividade:** a difusividade da turbulência cria uma rápida mistura de fluxos e, como consequência, aumenta a taxa de momento, massa e transferência de calor.
- **Tridimensional:** a turbulência é rotacional e tridimensional, e é caracterizada por alta taxa de vorticidade flutuante.
- **Dissipação:** a turbulência é um fenômeno dissipativo e requer um constante fornecimento de energia para compensar as perdas de viscosidade. Normalmente esta energia é fornecida pelo efeito de flutuabilidade (buoyancy).

Vale ressaltar que a turbulência não é uma característica dos fluidos propriamente dita, mas sim dos fluxos dos fluidos. Levando em consideração que cada fluxo é diferente, cada fenômeno de fluxo turbulento é único, mesmo que tenha várias características em comum a outros fluxos turbulentos.

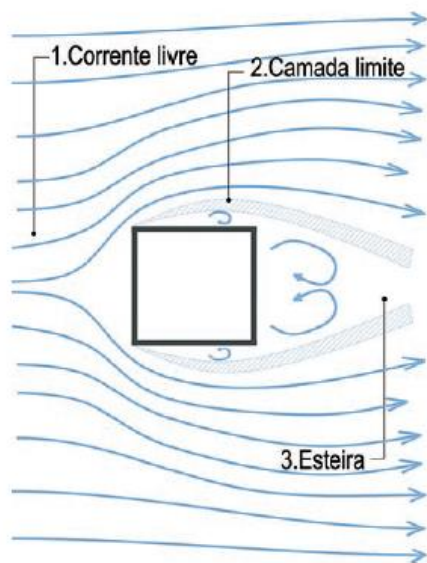


Figura 4. Esquema em planta das três zonas formadas no escoamento do vento em torno de um obstáculo não aerodinâmico.

Fonte: Aynsley et al. (1977).

Mais específico à climatologia urbana, o campo de vento nas cidades pode ser dividido em duas camadas verticais: a camada de ar até o nível das coberturas (UCL) e a camada de ar acima das coberturas (UBL). A primeira camada se estende da superfície terrestre até o nível mais alto dos prédios e a segunda camada está acima dos edifícios (OKE, 1987). No tocante à camada de ar até o nível das coberturas

(UCL), o vento pode influenciar significativamente nos microclimas urbanos pois auxilia na dispersão de poluentes e o movimento de ar contribui para redução das temperaturas de superfície por convecção. Em contrapartida, conforme abordado anteriormente, a ventilação urbana também é fortemente influenciada pela morfologia das cidades, responsável por modificar os relevos e as topografias naturais, alterando os padrões de rugosidade da superfície, que impactam diretamente na direção dos ventos e nas velocidades médias de incidência. Como resultado, as pressões de vento exercidas sobre a superfície de uma edificação podem sofrer uma redução significativa. A Figura 5 exemplifica como essa redução de pressão ocorre na prática. Em um prédio com altura de 20 m localizado em um espaço aberto sem obstruções, tendo uma velocidade de vento incidente de 4 m/s a uma altura de 10 m, a pressão de vento exercida sobre a fachada é entre 10 e 15 Pa. Em um outro cenário, em um edifício localizado em um ambiente urbano com alta densidade, a pressão exercida poderia ser de aproximadamente 0 Pa. Dessa forma, cria-se uma complexidade maior para definição da estratégia de ventilação natural aos projetos de edificações em áreas urbanizadas de alta densidade.

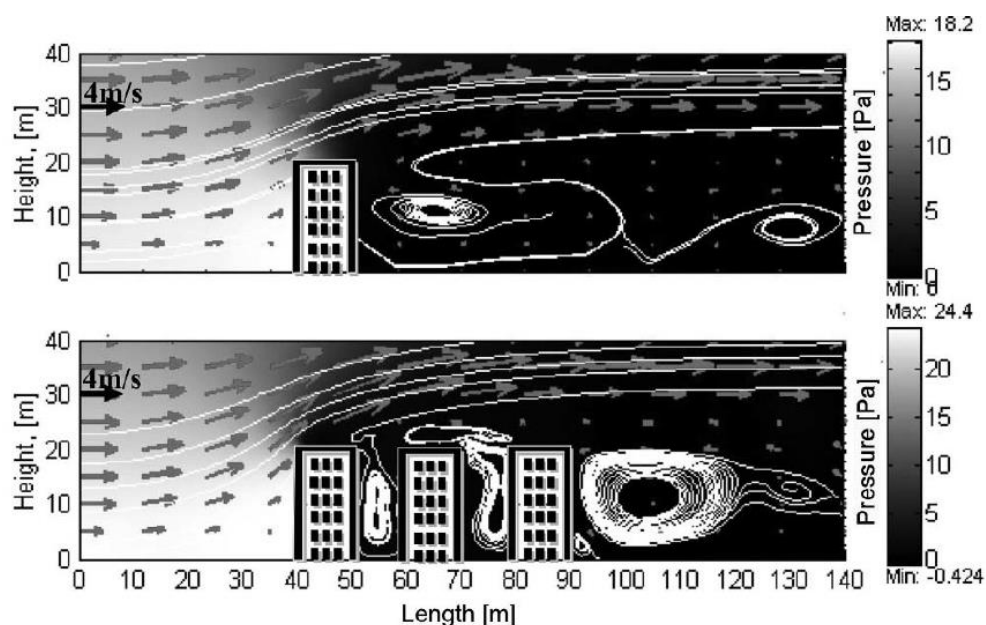


Figura 5. Velocidade de vento e pressões de vento induzidas são reduzidas no ambiente urbano.
Fonte: Santamouris e Wouters (2006).

Com base em estudos científicos que comprovam uma redução efetiva das velocidades de vento em ambientes urbanos, Santamouris e Wouters (2006)

recomendam que em projetos de edifícios naturalmente ventilados, localizados nesses contextos, deve-se adotar estratégias de ventilação baseadas em fluxos impulsionados pela flutuabilidade (em inglês “buoyancy-driven flows”), ou, em outras palavras, por efeito chaminé. Entretanto, é recomendado também que a ventilação por efeito de vento não seja desprezada, pois é possível que haja edifícios localizados em cidades (principalmente edifícios altos) que não tenham obstruções em seu entorno e que possam se beneficiar dos ventos predominantes. Assim, o ideal é que a solução seja customizada para cada projeto, levando em consideração a influência do contexto na situação do momento atual e de um potencial contexto futuro, pois as cidades (especialmente metrópoles em desenvolvimento como São Paulo) estão em constante transformação.

1.2 VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES: *fenômenos físicos*

O princípio da ventilação natural para edificações é fornecer um nível apropriado de qualidade de ar, por intermédio da remoção e da diluição de contaminantes aéreos, aumentando assim o nível de salubridade dos ambientes. Segundo Baker (2009), para manutenção de níveis aceitáveis de qualidade interna do ar, devem ser cumpridas as seguintes funções:

- Fornecer quantidade suficiente de oxigênio.
- Diluir odores produzidos pelo corpo.
- Diluir, para níveis aceitáveis, a concentração de dióxido de carbono produzido pelos ocupantes, assim como outros poluentes provenientes de outras fontes internas e externas.

É importante ressaltar que, para garantir o atendimento destes requisitos mínimos de qualidade do ar, diversos países estabeleceram regulamentações que definem a taxa de ar fresco (volume) mínima por pessoa. O CIBSE (2005), por exemplo, recomenda que a taxa mínima por pessoa seja de 10 litros/segundo.

Adicionalmente, a ventilação natural também desempenha um papel importante para manutenção de níveis aceitáveis de conforto térmico no ambiente por

meio da remoção do calor excedente proveniente da ocupação interna, além de proporcionar nos dias mais quentes um efeito fisiológico de resfriamento aos usuários. Isso ocorre porque o movimento de ar potencializa o arrefecimento corporal por convecção e auxilia a remover a umidade da pele por evaporação. Vale lembrar que as taxas de ventilação necessárias para cada uma destas funções são significativamente diferentes. Na Tabela 1, Baker (2009) demonstra que, para manter a qualidade do ar no inverno, uma taxa de ventilação mínima de 0,75–1,5 THA (trocas de ar por hora) é suficiente. Já em um cenário de verão, no qual existe uma necessidade de retirar o calor excedente do ambiente, essa taxa deveria ser entre 2–12 THA. Além disso, é recomendado um fluxo de ar entre 0,5 e 1,5 m/s para se alcançar um resfriamento fisiológico adequado, nos meses mais quentes.

Tabela 1. Taxas mínimas de ventilação para diferentes funções da ventilação.
Fonte: Baker (2009).

Ventilation	Purpose	Ventilation rate
Minimal ventilation	To maintain air quality	Typical winter case 0.75 – 1.5 ac/h
Space cooling	To vent unwanted heat	Typical summer case 2 – 12 ac/h
Physiological cooling	To provide direct air movement to occupants	Typical summer case 0.5 – 1.5 m/s

Levando em consideração os princípios físicos do movimento de ar, verifica-se que a ventilação natural pode ser gerada por diferenças de pressões ocasionadas por variações de temperatura entre a área interna e externa do edifício (pressão estática), conhecida por efeito chaminé (ou também por fluxos impulsionados pela flutuabilidade). Além disso, a ventilação natural também pode ser gerada pela ação dos ventos (pressão dinâmica). Conforme mencionado por Santamouris e Wouters (2006), ambas as pressões de vento e de flutuabilidade (buoyancy) podem exercer um efeito combinado nos fluxos de ar através de janelas ou aberturas na envoltória do edifício, no entanto pode haver uma diferença significativa entre a magnitude das pressões em função da força motriz que está agindo.

O CIBSE (2005) demonstra na Figura 6 uma comparação entre as pressões exercidas em edifícios quando ventilados por ação dos ventos ou por efeito chaminé. Na figura A, duas diferenças de altura são apresentadas: 3,5 m e 10,5 m. Estas são alturas típicas entre a entrada e a saída de ar em um pavimento típico de um edifício, em comparação com um prédio de três andares com átrio central no qual a entrada de ar se dá no nível mais baixo e a saída de ar no andar mais alto. De uma maneira similar, na figura B duas linhas são demonstradas, representando as pressões de vento para uma variação típica de coeficiente de pressão entre a abertura de entrada e saída de ar em uma edificação (0,1 e 0,5). As caixas hachuradas de verde representam as condições típicas encontradas em projetos para sistemas de ventilação natural com foco nos meses de verão (uma diferença de temperaturas interna e externa de 3 K e uma velocidade de vento entre 1 e 2,2 m/s).

Como conclusão, as figuras 6 A e B demonstram que, para projetos em condições de verão, as pressões para efeito chaminé e por ação de vento podem ser compatíveis, a não ser que o projeto consiga alcançar uma ampla diferença nos coeficientes de pressão da entrada e saída de ar. No entanto, vale ressaltar que, na maior parte dos casos, é difícil alcançar uma grande diferença de coeficientes de pressão para todos os ângulos de incidência do vento. Além disso, considerando que a direção e a intensidade do vento são também inerentemente variáveis, um projeto de ventilação que se baseie em uma diferença muito grande de coeficiente de pressão, provavelmente, não será eficiente. Por esta razão é recomendado que o cálculo de dimensionamento das aberturas tenha como premissa-base o efeito chaminé, pois assim a ação dos ventos (quando disponível) irá contribuir para impulsionar ainda mais o fluxo de ar nos ambientes.

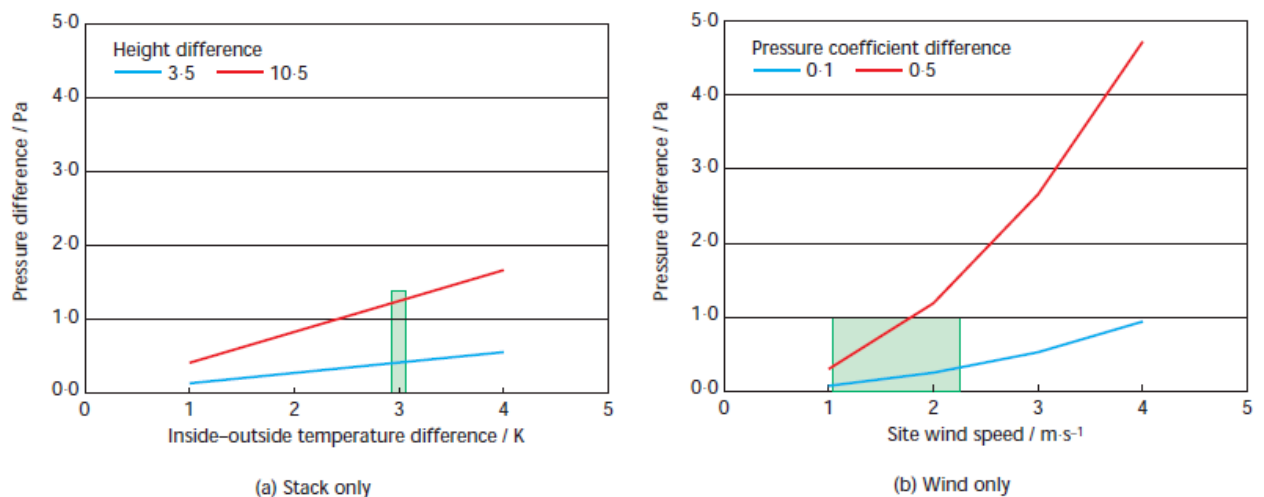


Figura 6. Pressões relativas referentes às forças motrizes do movimento de ar.
Fonte: CIBSE (2005).

1.2.1 Ventilação natural por ação dos ventos

Na ventilação por ação dos ventos, os fluxos de ar externos geram um diferencial de pressão ao longo da envoltória do edifício. Como pode ser visto na Figura 7, a face que recebe a incidência direta do vento tem pressão positiva e as faces opostas têm pressões negativas, gerando um efeito de sucção. De acordo com Santamouris e Wouters (2006), a pressão média decorrente do fluxo do vento pode ser descrita na equação:

$$P_w = C_p P V^2 / 2,$$

onde:

C_p = coeficiente de pressão estática;

V = velocidade média ao longo do tempo em uma determinada altura (m/s).

Os coeficientes de pressão são normalmente obtidos em ensaios de túneis de vento ou utilizando softwares de dinâmicas de fluidos (CFD). Eles podem ter um valor negativo ou positivo de acordo com a forma do edifício e sua localização.

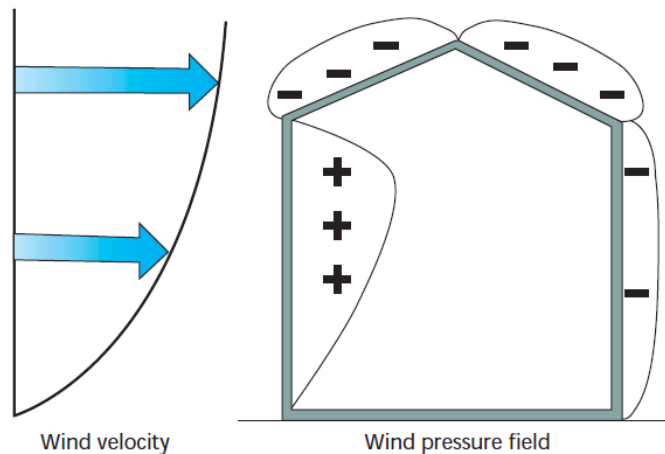


Figura 7. Pressões de vento agindo no edifício.
Fonte: CIBSE (2005).

1.2.1.1 Coeficiente de pressão

Levando em consideração que o diferencial de pressão em uma edificação é a força motriz para a ventilação natural, é importante notar que a forma do edifício pode gerar alterações nos campos de pressão das construções que implicam mudanças nas características do escoamento de ar nos espaços arquitetônicos. Dessa forma, o conhecimento da distribuição das pressões na envoltória do edifício é de suma importância para avaliar as cargas de vento e calcular fluxos/taxas de ventilação no interior do edifício. Neste contexto, a Figura 8 demonstra, por meio de vetores, uma representação da pressão dinâmica exercida pelo vento livre de obstruções em dois objetos. Neste exemplo, os vetores são proporcionais ao coeficiente de pressão (C_p) em cada lado dos dois tipos de objeto (BITTENCOURT et al., 2010).

De acordo com Ghiaus e Allard (2005) o coeficiente de pressão é um número adimensional que permite quantificar o resultado da ação dos ventos na envoltória do edifício e é variável em cada ponto da superfície conforme demonstrado na Figura 9.

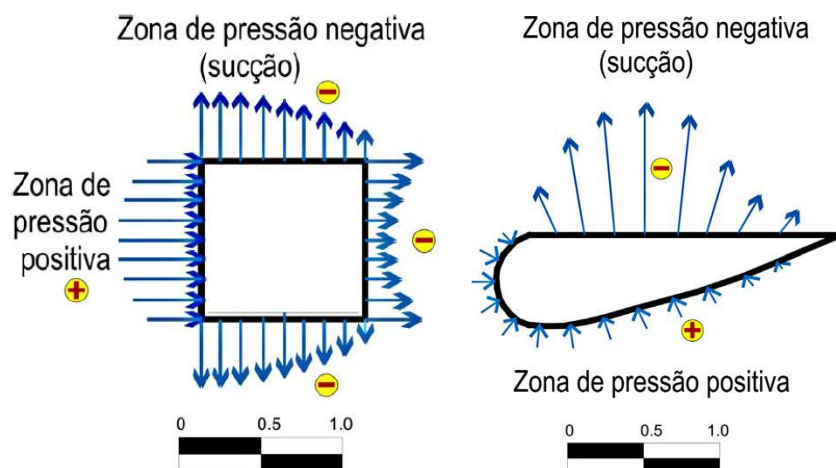


Figura 8. Campos de pressão em um cubo e em um corpo aerodinâmico.
Fonte: Aynsley et al. (1977); Givoni (1976).

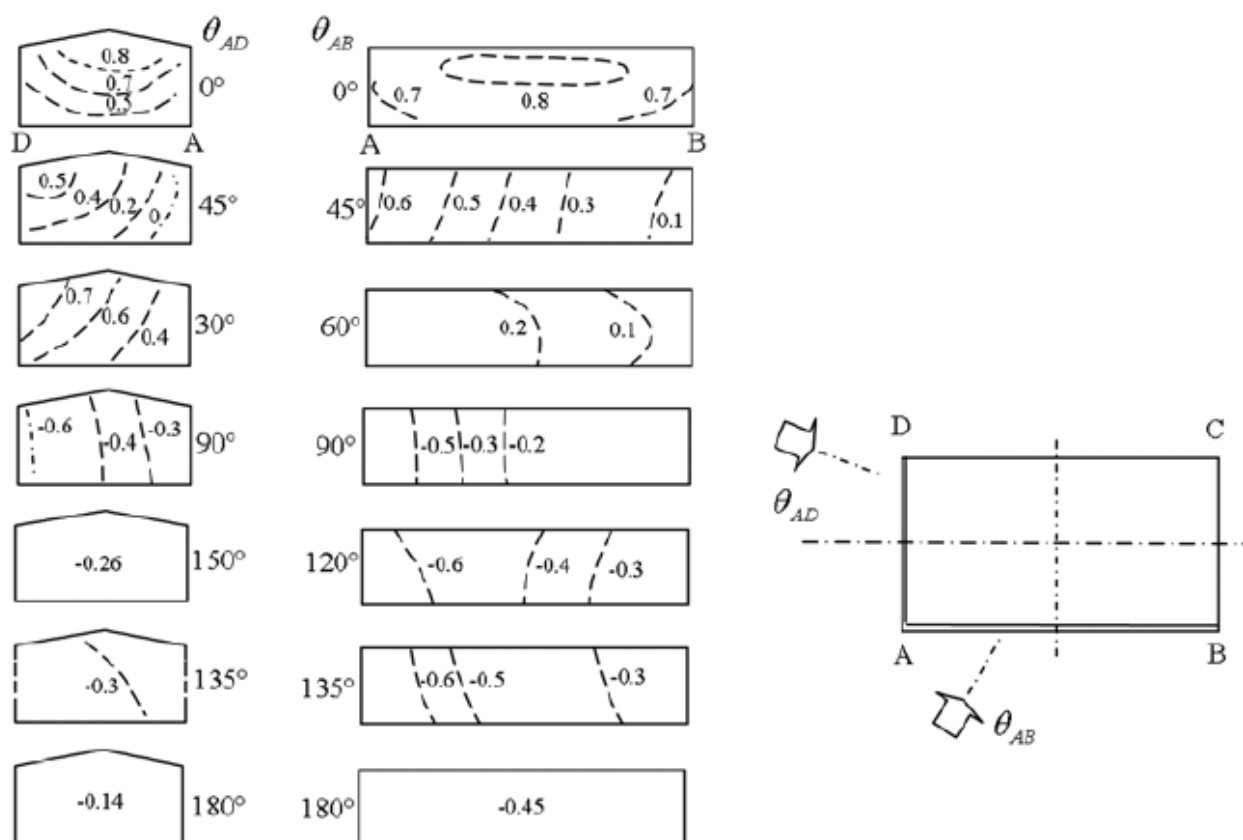


Figura 9. Distribuição de C_p na fachada de um edifício.
Fonte: Bittencourt et al. (2010).

O coeficiente de pressão pode ser descrito pela equação (SANTAMOURIS; WOUTERS, 2006):

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

Onde:

C_p= Coeficiente de pressão adimensional;

P_x= Pressão em um determinado ponto da envoltória do edifício (Pa);

P_e= Pressão estática de referência (Pa);

P_d= Pressão dinâmica de vento (Pa).

De acordo com Bittencourt et al. (2010), a pressão estática é a pressão exercida adjacente por um volume de fluido. Um exemplo disso é a pressão exercida pela água nas paredes de um reservatório. Já a pressão dinâmica está relacionada à intensidade do movimento de ar, e é produzida pela força do vento. A pressão dinâmica representa a energia cinética total do ar que atinge um objeto e ocorre em função da velocidade do vento e da densidade do ar, conforme demonstrado na equação a seguir:

$$q = \frac{\rho}{2} V^2$$

Onde:

q = pressão dinâmica (Pa);

ρ = densidade do ar (kg/m³);

V = velocidade do vento na altura do edifício (m/s).

1.2.2 Ventilação por efeito chaminé

Conforme mencionado anteriormente, o movimento de ar na ventilação por efeito chaminé é ocasionado por uma diferença de temperatura entre o interior e o exterior do edifício, gerando um gradiente vertical de pressão que faz com que o ar se movimente verticalmente (caso a temperatura interna do edifício seja maior que a externa). Isso ocorre porque o ar frio é menos denso que o ar quente, e dessa forma, se duas colunas de ar estão conectadas, o ar frio vai descer e deslocar o ar quente e leve para cima. Se considerarmos um prédio muito simplificado com o formato de uma caixa, na maior parte do ano o ar interno do edifício será mais quente que o externo, como resultado dos ganhos de calor provenientes de radiação solar ou ocupação.

A Hidrostática define que a pressão em um ponto se reduz com a altura, e a taxa de redução é proporcional à densidade do fluido (CIBSE, 2005). Este fenômeno é demonstrado na Figura 10 pelos dois gradientes de pressão. Nesse caso é possível verificar que o ar externo é mais frio e consequentemente mais denso, e, portanto, a pressão diminui em função da altura mais rapidamente na parte externa do prédio (linha azul) que na parte interna (linha vermelha). Neste mesmo exemplo, em razão do fato de que as pressões internas e externas variam com a altura, haverá uma diferença de pressão ao longo da parede de separação (envoltória). Caso sejam localizadas aberturas nessa parede, haverá uma troca de ar que será proporcional à diferença de pressão agindo ao longo dela.

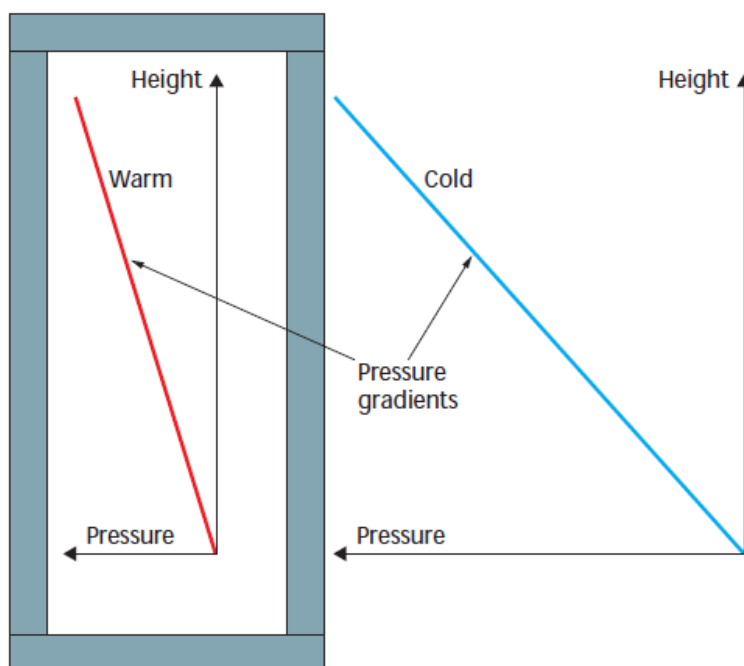


Figura 10. Esquema demonstrando os gradientes de pressão.

Fonte: CIBSE (2005).

Conforme mencionado por CIBSE (2005), existem três relações físicas que controlam o fluxo de ar por efeito chaminé. São elas:

- **Conservação de Massas:** o fluxo de ar que entra no edifício deve ser equilibrado pelo fluxo de saída (exaustão).
- **Pressão Hidrostática:** é a pressão que um fluido exerce sobre outro fluido decorrente de seu peso em função da gravidade. No caso da ventilação por efeito chaminé, o gradiente de pressão é proporcional à densidade do ar.
- **Equação de Fluxo:** o fluxo de ar através de aberturas depende da área, do coeficiente de descarga e da diferença de pressão. Quanto maior a abertura e maior a diferença de pressão, maior será o fluxo de ar.

Segundo Baker (1987), o fluxo de ar por efeito chaminé pode ser expresso pela seguinte equação:

$$Q = CA\sqrt{h(T_i - T_e)} \text{ (m}^3\text{/s)}$$

Onde:

Q= fluxo de ar (m³/s);

C= coeficiente que representa a resistência ao escoamento do fluxo de ar (0,12 para a maioria das aberturas);

A= área da abertura (m²);

h= altura média entre as aberturas de entrada e de saída do ar (m);

Ti= temperatura do ar interior (°C);

Te= temperatura do ar exterior (°C).

1.3 ESTRATÉGIAS E APLICAÇÕES DA VENTILAÇÃO NATURAL

Existem algumas maneiras de se aplicar a ventilação natural em projetos de edificações, que podem variar com a forma e função dos espaços arquitetônicos (ocupação e layout), considerando que algumas estratégias de ventilação são mais adequadas para algumas tipologias espaciais dependendo de como respondem às relações físicas que regem o fluxo de ar.

Em todos os casos a profundidade da planta, o pé-direito dos ambientes e o dimensionamento das aberturas têm uma grande relevância para garantir a eficácia de tais estratégias. Por isso algumas regras básicas podem ser aplicadas logo na concepção inicial do projeto, norteando as ações do arquiteto para se obter o melhor aproveitamento dos recursos disponíveis na natureza, tendo em vista as oportunidades e limitações do clima local. Vale ressaltar que existem diversas estratégias de ventilação natural que vêm sendo aplicadas desde os tempos mais remotos nas arquiteturas vernaculares até os dias de hoje, no entanto, nesta seção da pesquisa será dada ênfase aos seguintes sistemas: *ventilação unilateral*, *ventilação cruzada* e *ventilação utilizando átrios e vazios arquitetônicos*.

A ventilação utilizando chaminé solar, que é um interessante método para impulsionar o fluxo de ar se valendo da radiação solar, teria eficácia reduzida no clima de São Paulo em razão do percentual elevado de céu encoberto ao longo do ano, por isso não será abordada em detalhe nesta pesquisa.

1.3.1 Ventilação unilateral

No contexto dos edifícios de escritório a ventilação natural unilateral é mais frequentemente encontrada em layouts com salas fechadas, ou em edifícios que utilizam plantas com núcleo de serviços central, que pode bloquear o fluxo cruzado. Nestes casos o CIBSE (2005) recomenda que a profundidade da planta não seja maior que duas vezes a altura do pé-direito (Figura 11), definindo assim a zona passiva de ventilação natural. É interessante notar que outros autores (BAKER, 2009; CIBSE, 2019) também definem esta mesma proporção para a zona de iluminação natural, sendo uma referência importante para as premissas iniciais de projeto. Adicionalmente, o CIBSE (2005) também fornece uma instrução para potencializar o

efeito da ventilação natural unilateral, utilizando os conceitos da ventilação por efeito chaminé. A Figura 11 B ilustra a recomendação de se ter uma distância mínima de 1,5 m entre a altura das aberturas, permitindo que o ar frio entre na abertura inferior e seja exaurido pela abertura superior.

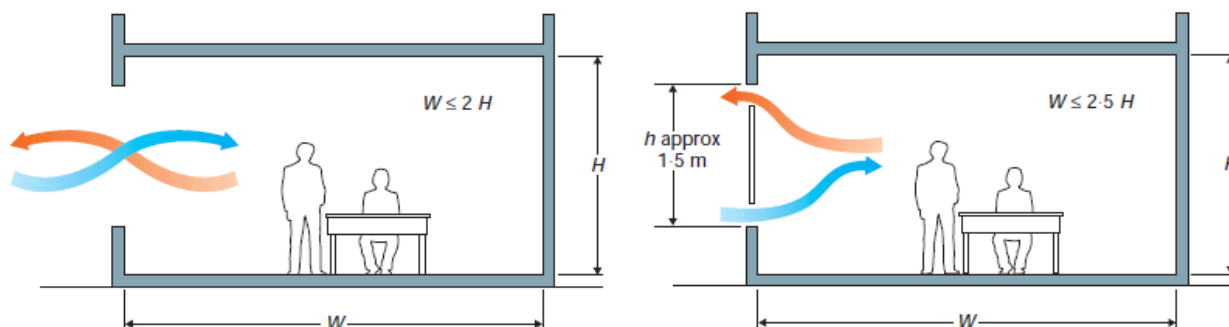


Figura 11. Esquema demonstrando a ventilação natural unilateral com uma única

Fonte: CIBSE (2005).

1.3.2 Ventilação cruzada

A ventilação cruzada ocorre quando há aberturas em ambos os lados do ambiente. As aberturas não precisam necessariamente estar em fachadas opostas. Aberturas em fachadas adjacentes podem oferecer altas taxas de ventilação, dependendo também do ângulo de incidência do vento (GIVONE, 1994). Esse tipo de ventilação se beneficia, na maior parte dos casos, das pressões exercidas pelo vento (pressões dinâmicas), que, conforme já demonstrado anteriormente, geram um efeito de sucção (zona de pressão negativa) que potencializa o movimento de ar. No entanto, em algumas situações o ar pode ser movido por densidades diferentes caso haja uma chaminé vertical acoplada ao sistema.

A Figura 12 ilustra a recomendação do CIBSE (2005) para profundidades máximas de planta (em função do pé-direito), de modo que seja possível garantir a eficácia desta estratégia. A manutenção desse limite de até cinco vezes a altura do pé-direito é importante, pois, conforme o ar se move através da zona, vai haver um aumento de temperatura e a perda de qualidade do ar, já que o ar adquire calor e poluentes do espaço ocupado. Isso implica plantas mais estreitas, que normalmente são aplicadas em prédios de formatos lineares, apesar de que o mesmo efeito é alcançado quando se tem um prédio que se desenvolve em torno de um pátio central

aberto. O maior desafio para este tipo de estratégia é organizar a forma do prédio de modo que se obtenha uma diferença significativa nos coeficientes de pressão de vento de entrada e saída de ar. Isso será mais difícil de alcançar nos casos com pátio central, pois as aberturas localizadas a sotavento e o pátio vão estar em pressões semelhantes, como pode ser visto na Figura 13.

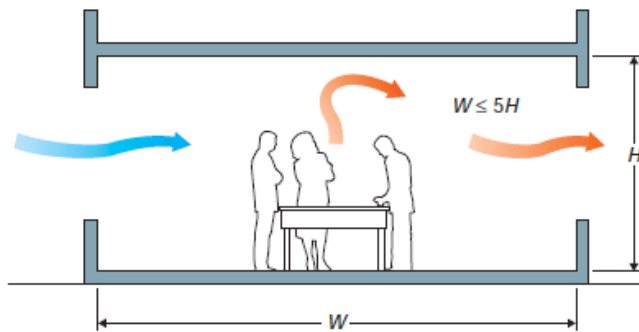


Figura 12. Esquema demonstrando a ventilação natural cruzada e a proporção ideal de profundidade de planta em função do pé-direito.

Fonte: CIBSE (2005).

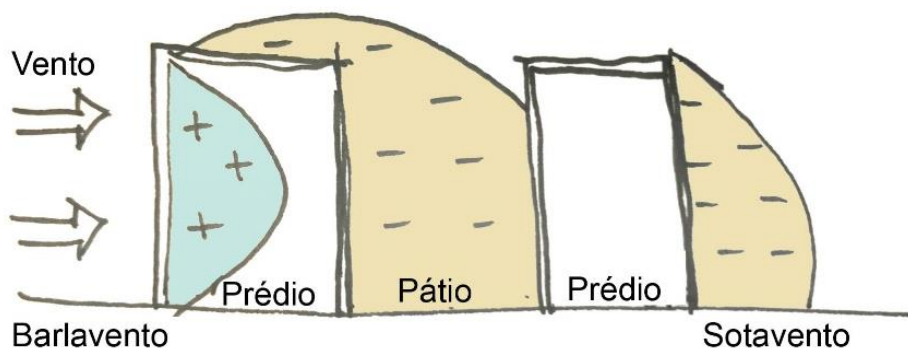


Figura 13. Corte esquemático demonstrando a distribuição das pressões de vento em um prédio com pátio central.

Fonte: Autor desta tese.

1.3.3 Ventilação em átrios e vazios arquitetônicos

A localização do átrio no edifício é o fator principal que vai determinar as vantagens ambientais que se é possível obter com esta tipologia e configuração espacial. De acordo com Moosavi et al. (2014), existem quatro principais categorias de formas e localização de átrios que foram citadas na literatura conforme pode ser visto na Figura 14.

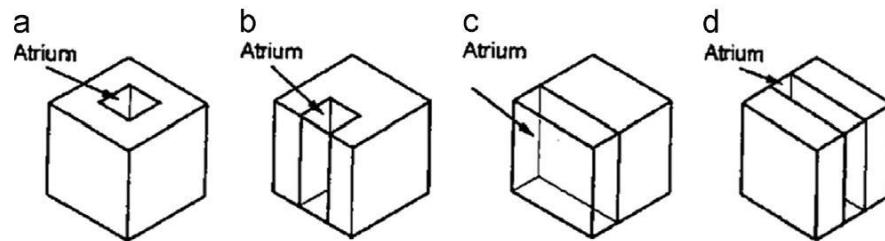


Figura 14. Quatro formas genéricas de átrios: (a) centralizado, (b) semifechado, (c) anexo, (d) linear.
Fonte: Moosavi et al. (2014).

As diversas configurações espaciais vão ter um impacto significativo nas estratégias de ventilação natural e no encaminhamento do fluxo de ar dentro do ambiente. A Figura 15 demonstra quatro configurações de átrios e os respectivos padrões de ventilação. Em cada átrio, o papel do vazio é diferente, baseado no propósito de ventilação do edifício, conforme descrição abaixo:

- a. O átrio recebendo ar dos ambientes adjacentes e exaurindo-o para fora do prédio.
- b. O átrio recebendo ar diretamente e conduzindo o fluxo aos ambientes adjacentes.
- c. O átrio recebendo o ar ambiente para os espaços adjacentes e exaurindo-o para fora do prédio.
- d. Átrio ventilado direta e indiretamente, e exaurindo o ar para fora do prédio.

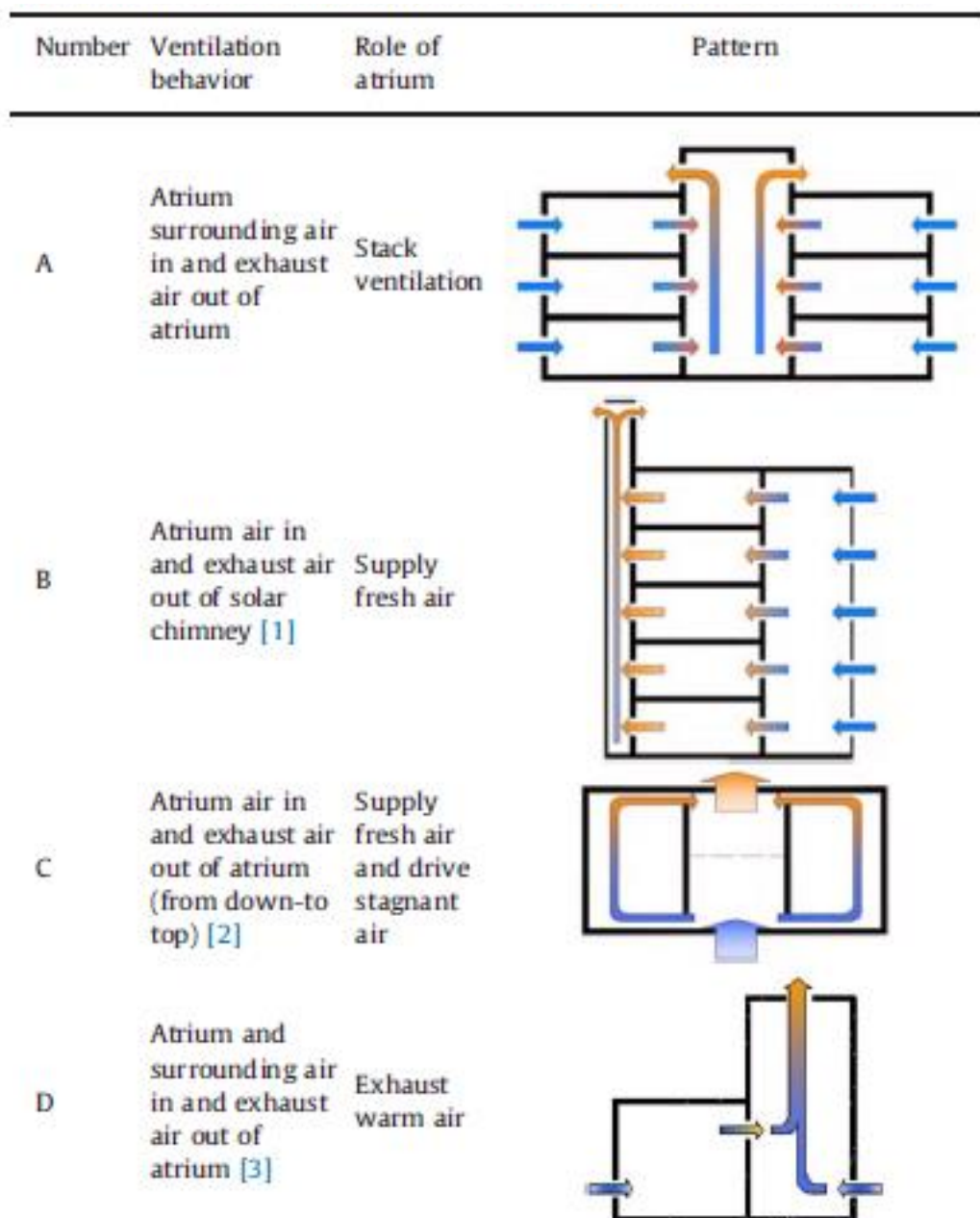


Figura 15. Padrões de ventilação em átrios, baseados na literatura.

Fonte: Moosavi et al. (2014).

Em síntese, o dimensionamento dos átrios de forma a impulsionar a ventilação natural por efeito chaminé deve levar em consideração duas variáveis: altura do átrio e diferença de temperatura entre a área interna da edificação e o ar externo. Como pode ser visto na Figura 16, quanto maior a variação de temperatura e altura do átrio, maior será a diferença de pressão estática disponível para mover o fluxo de ar. Vale ressaltar que o sistema tende a trabalhar de forma mais eficiente nos meses de inverno, quando a variação de temperatura entre o ar externo e interno é maior. No entanto, como o sistema de ventilação deve ser dimensionado para os períodos mais

quentes (quando não há tanta diferença de temperatura entre o interior e o exterior), deve-se optar por átrios mais altos, de modo a obter maiores taxas de ventilação para arrefecimento do ambiente e dos usuários.

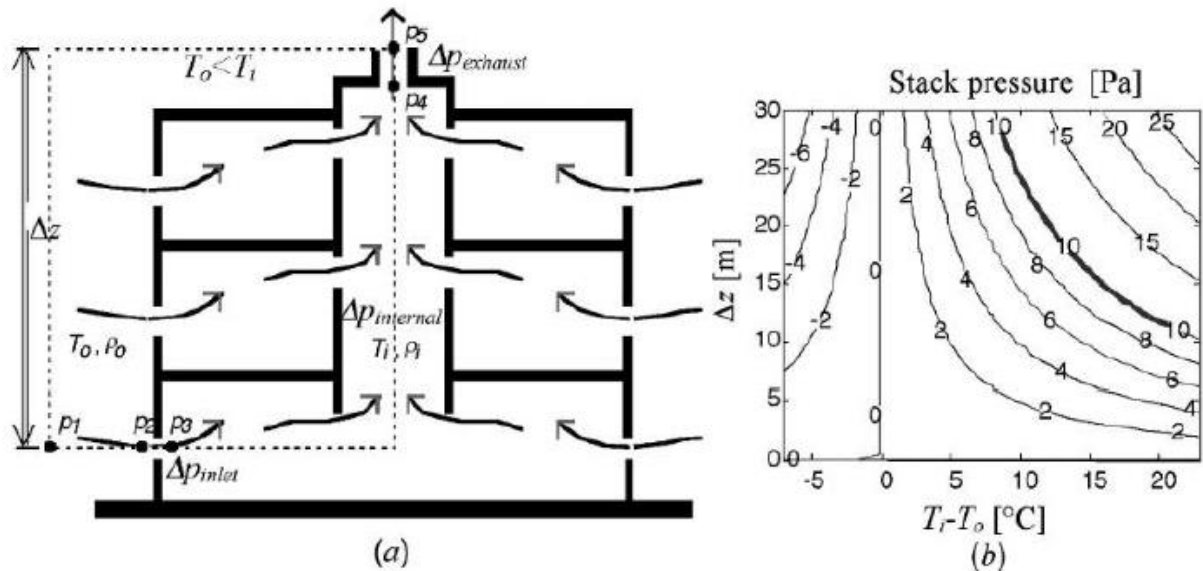


Figura 16. Pressão estática por efeito chaminé como força motriz da ventilação natural. (a) Pressão associada a ventilação natural por efeito chaminé em átrio central. (b) Variação da pressão estática em função da diferença de temperatura e altura da edificação.

Fonte: Santamouris e Wouters (2006).

Outro aspecto a ser observado em detalhes, no projeto de sistemas de ventilação utilizando átrios e vazios, é a posição e o dimensionamento das aberturas. Entre todos os aspectos que dizem respeito às aberturas nesse tipo de sistema, o mais relevante é o dimensionamento. Em geral a estratificação térmica nos átrios diminui bastante com o aumento na área das aberturas (WANG; ABDULLAH, 2016). Entretanto, para se obter um fluxo de ar bem distribuído através de toda a edificação, é necessário utilizar uma proporção adequada de aberturas de entrada e saída de ar. Por exemplo, em um clima temperado utilizando ventilação por efeito chaminé, um átrio aumenta o fluxo de ar através dos pavimentos se apenas as aberturas mais altas forem de tamanho mediano, ao passo que as aberturas inferiores forem suficientemente pequenas (HOLFORD; HUNT, 2003). Adicionalmente, se aumentar o número de aberturas, conseqüentemente irá aumentar a taxa do fluxo de ar no átrio, no entanto isso irá diminuir o fluxo de ar em cada pavimento, ocasionando um

aumento de temperatura nos ambientes adjacentes. Isso vale para quase todas as alturas de prédios (ZHANG et al., 2011).

Quando disponível ventilação por ação de ventos sem grandes obstruções, foi verificado que posicionar as aberturas de entrada de ar no nível mais baixo a barlavento pode aumentar o fluxo de ar e fornecer ar fresco para todo o átrio e os ambientes adjacentes. Ademais, se a saída de ar for projetada de modo que esteja localizada em uma zona de pressão negativa de vento, isso irá aumentar a eficácia do efeito chaminé (MOOSAVI et al., 2014).

1.4 CONFORTO TÉRMICO: PMV e modelo adaptativo

O conceito de conforto térmico tem um papel fundamental na definição das estratégias para a regulação térmica e, conseqüentemente, para a demanda energética dos edifícios. Dessa forma, qualquer esforço em direção à prevenção contra o uso de ar-condicionado, buscando a implementação de estratégias de resfriamento passivo, irá implicar a reavaliação do conceito de conforto térmico, visto que as condições ambientais dos espaços internos variam amplamente ao comparar um edifício naturalmente ventilado com um condicionado artificialmente.

Desde o início do século 20, diferentes pesquisas foram realizadas em busca de encontrar maneiras para mensurar e avaliar o nível de conforto térmico das pessoas. Atualmente, a teoria de conforto mais utilizada é baseada em estudos que foram realizados em câmaras climáticas (laboratórios termicamente controlados), onde as reações dos sujeitos foram monitoradas em um conjunto de condições térmicas e atividades metabólicas. As suas respostas finais foram relacionadas a um modelo de balanço térmico no qual a neutralidade térmica é descrita como um estado fixo de equilíbrio entre a perda térmica para o ambiente e o ganho térmico metabólico. O modelo de equilíbrio de calor mais reconhecido é o do voto médio previsto (sigla em inglês: predicted mean vote, PMV) de Fanger (1970), o qual utiliza uma escala numérica para definir os resultados obtidos pelos experimentos em câmaras climáticas.

De acordo com Fanger (1970), o conforto térmico é o produto que é produzido e vendido ao consumidor pela indústria do ar-condicionado. Esta abordagem conta com a suposição de que um ambiente rigorosamente controlado, que mantém temperaturas estáveis durante as diferentes estações do ano, é requisito fundamental para proporcionar condições ótimas de satisfação aos ocupantes. Esta consideração é a base para padrões internacionais como a ISO 7730 e a CEN 15251, que dividem edifícios em categorias A, B ou C, de acordo com o nível de controle ambiental interno (NICOL; HUMPHREYS; ROAF, 2012).

Contudo, vale ressaltar que avaliações recentes de pós-ocupação provam que a satisfação dos ocupantes em edifícios climatizados artificialmente não é sempre tão alta quanto a indústria do ar-condicionado afirma que é. Uma pesquisa de pós-ocupação conduzida por três pesquisadores (CHOI et al., 2010), durante um período de seis anos (2003-2008), coletou dados de 402 estações de trabalho em 38 andares de 20 edifícios comerciais nos Estados Unidos. Como resultado, foi verificado que, apesar de essas edificações terem um controle de temperatura baseado nos níveis de conforto térmico estabelecidos pela legislação, os ocupantes reportaram uma grande variação nos níveis de satisfação, desde muito satisfeito a muito insatisfeito. Foi encontrada uma proporção de 50% das pessoas ligeiramente insatisfeitas ou muito insatisfeitas, muito abaixo do objetivo de 20% de percentual de pessoas insatisfeitas (da sigla em inglês *percentage of people dissatisfied*, PPD) recomendado pela ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*). Ademais, outra pesquisa de pós-ocupação realizada em um edifício comercial da Malásia reportou que 73% dos ocupantes se sentiam desconfortáveis com relação ao sistema de resfriamento e às temperaturas internas (KHALIL et al., 2009).

A principal crítica com relação ao modelo de equilíbrio de calor e à internacionalização dos padrões é que esta abordagem se baseia em um valor universal pelo qual dois funcionários de escritórios locados em diferentes regiões do mundo necessitam das mesmas condições térmicas para alcançar satisfação. Ademais, as condições dentro de edifícios reais estão em constante mudança. Mesmo em sistemas muito eficientes de controles centrais de ar-condicionado, algumas variações de temperaturas internas podem ser observadas como consequência da variação das cargas internas de calor decorrente do aumento do número de ocupantes

ou do efeito de radiação solar direta. Além disso, a extrapolação dos resultados alcançados em uma câmara climática controlada, para condições normais de vida, é incompatível, visto que o corpo nunca está em condições estáveis na vida real (BAKER, 2009). Outrossim, os cálculos do PMV presumem uma só unidade de clo, de acordo com a atividade realizada no edifício e, no entanto, pessoas na vida real irão mudar as suas vestimentas de acordo com as diferentes estações do ano e isso irá afetar a sua percepção com relação ao conforto.

Pode-se concluir então que os padrões convencionais de conforto térmico exercem uma contribuição efetiva para a expansão da indústria de AVAC e para o aumento do consumo energético.

Pesquisas recentes têm demonstrado também que pessoas em diferentes regiões do mundo estão satisfeitas com ambientes térmicos que não seguem os limites estabelecidos por Fanger. A Figura 17 sintetiza os resultados de uma pesquisa de campo realizada em Singapura, que pertence à base de dados da ASHRAE. O estudo compara a aceitabilidade dos ocupantes em edifícios climatizados artificialmente com a daqueles de edifícios naturalmente ventilados. Nesse estudo é demonstrado que níveis aceitáveis de conforto térmico são alcançados em diferentes temperaturas e taxas de umidade, quando comparados os dois casos, ficando evidente que pessoas podem se sentir confortáveis em uma vasta gama de condições térmicas. Os altos limites térmicos considerados aceitáveis em edifícios naturalmente ventilados (acima de 30°C) podem ser entendidos pela pesquisa realizada por Humphrey em 1974, na qual ele conclui que a temperatura média mensal (externa) possui uma grande influência sobre as temperaturas de neutralidade térmica em que as pessoas reportam satisfação. Ademais, Nicol et al. (2007) mencionaram que, em diferentes pesquisas, sujeitos reportaram conforto em temperaturas que seguem as expectativas correspondentes com as condições típicas dos seus ambientes usuais, levando em consideração o seu histórico térmico.

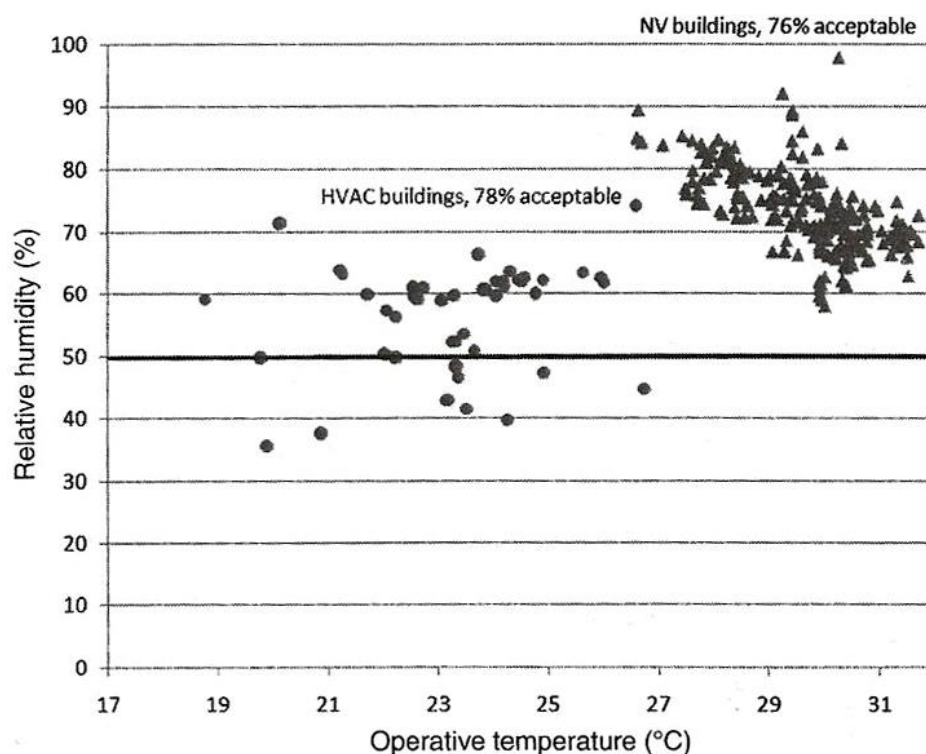


Figura 17. Taxas similares de aceitação para diferentes ambientes térmicos internos em edifícios com AVAC e naturalmente ventilados em Singapura.

Fonte: Zhang et al. (2011).

1.4.1 Conforto adaptativo

Baseado em extensas pesquisas de campo, nas quais foram avaliadas as sensações térmicas dos participantes em uma escala subjetiva e comparadas a variáveis ambientais, Humphreys e Nicol (2000) propuseram um modelo de conforto adaptativo. O princípio fundamental expressado por esse modelo é o de que ocupantes reagem com diferentes comportamentos para restaurar o seu conforto quando as condições ambientais mudam por alguma razão, afetando o equilíbrio do corpo. Essas reações podem ser resumidas em duas formas básicas: ajustes para o conforto ideal de temperatura por intermédio da troca de vestuário, postura ou atividade exercida. Por exemplo, a mudança do valor de isolamento de 0,3 clo (shorts e camiseta) para 1,0 clo (terno) pode resultar em um aumento da temperatura de conforto em 3 K (BAKER, 2009). O acesso a bebidas quentes ou frias também oferece oportunidades de adaptação recomendadas, que afetam o equilíbrio térmico pessoal.

A segunda maneira é a de ajustar as condições ambientais para satisfazer as suas necessidades, por meio do uso de elementos controláveis como cortinas,

ventiladores de mesa, janelas passíveis de abertura, layout de mobiliário flexível e da possibilidade de migração entre salas com o intuito de encontrar um lugar mais confortável. É também sabido que permanecer próximo de uma janela pode aumentar a taxa de tolerância de um ocupante com relação às suas condições térmicas (BAKER, 2009). Inclusive, a proporção de vistas externas pode ter um impacto positivo no bem-estar geral, o que pode levar ao aumento de produtividade de um funcionário.

Portanto, o tipo de atividade que é executada em um edifício e o padrão de ocupação irão também exercer uma grande influência no conceito de conforto dos usuários. Em edifícios de escritório, geralmente, funcionários possuem códigos de vestimenta restritos e, muitas vezes, são obrigados a estar em suas estações de trabalho por horas, limitando-se a faixa de aplicação das oportunidades adaptativas. Em contrapartida, em residências, os moradores possuem uma flexibilidade muito maior e estão hábeis a adaptar as suas condições para alcançar a neutralidade térmica. Contudo, atualmente algumas empresas estão criando novas maneiras de ocupar os espaços internos dos edifícios corporativos com o fim de proporcionar uma qualidade ambiental melhor e um aumento de produtividade. Por exemplo, as orientações para novos escritórios da Siemens (2010) estipulam que os funcionários devem eleger os lugares mais adequados para o seu trabalho, alternando os elementos funcionais de sua própria escolha. Como consequência disso, os funcionários não possuem mais estações de trabalho estipuladas, sendo possível trabalhar inclusive em áreas de café. Como resultado, os ocupantes possuem maior liberdade para tomar ações adaptativas em busca de um aumento em seu conforto térmico e também com relação à sua satisfação com o ambiente.

A Figura 18 ilustra que, em condições similares à de câmaras de conforto onde não se podem encontrar oportunidades adaptativas, qualquer desvio da zona de conforto estipulada por oscilações nos estímulos (por exemplo, temperatura) pode gerar estresse (BAKER, 2009). Em contraste, quando se aplicam oportunidades adaptativas, o estresse só é encontrado quando a zona adaptativa é superada. Em um cenário favorável, os ocupantes podem se sentir satisfeitos com limites térmicos maiores.

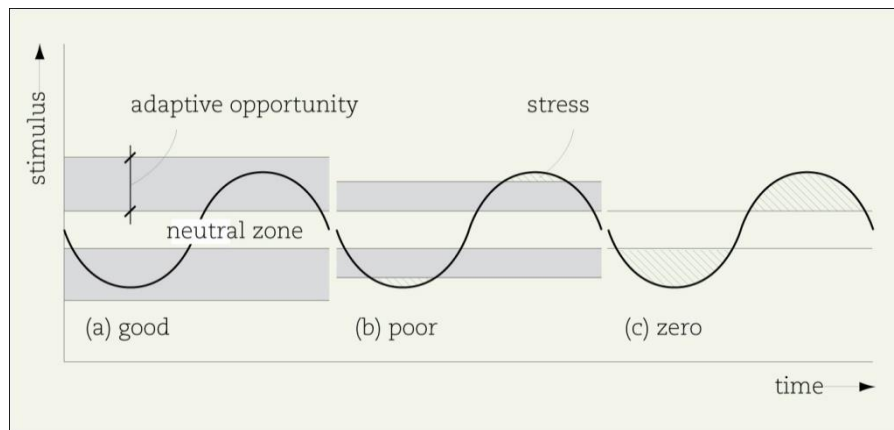


Figura 18. A zona neutra é estendida por meio das oportunidades adaptativas.

Fonte: Baker (2009).

É importante ressaltar que, desde 2004, a ASHRAE aceita a opção do uso do modelo de conforto adaptativo somente para edifícios ventilados naturalmente e o modelo de PMV para edifícios condicionados por AVAC. Entretanto, Humphreys e Nicol (2002) sugeriram que essa adaptabilidade é uma característica intrínseca do comportamento humano em todos os tipos de ambientes. Portanto, pode-se concluir que não é natural que seres humanos trabalhem e vivam em ambientes com somente uma temperatura, dado que essas condições não podem ser encontradas em ambientes naturais.

Capítulo 2

CAPÍTULO 2. ANÁLISE TÉCNICA DE PRECEDENTES: edifício sede do Commerzbank, em Frankfurt, e edifício 30th St. Mary Axe, em Londres

Neste capítulo foi realizada uma análise técnica de precedentes que aplicaram de forma bem-sucedida os conceitos físicos da ventilação natural, utilizando átrios para impulsionar o movimento de ar por efeito chaminé. Vale ressaltar que, nesses casos, as formas dos edifícios e a configuração dos espaços internos foram ajustadas para melhor atender as demandas de ventilação e iluminação natural. A análise técnica de precedentes focou em dois edifícios: edifício sede do Commerzbank, em Frankfurt, e edifício 30th St. Mary Axe, em Londres. A revisão crítica do desempenho ambiental de edifícios em uso é fundamental no processo de aprendizagem para a compreensão do real potencial de determinadas soluções de projeto, abrangendo desde o comportamento do usuário até questões técnicas da operação do edifício.

2.1 SEDE DO BANCO COMMERZBANK

O edifício da sede do banco Commerzbank em Frankfurt, na Alemanha, foi escolhido como um exemplo de projeto para esta pesquisa, por ser um ícone da nova geração de edifícios que utiliza ventilação natural como sistema de resfriamento passivo durante a maior parte do ano. O projeto conta com um complexo sistema de ventilação que interliga terraços laterais por intermédio de átrios, proporcionando ao edifício resiliência em relação às variações do clima externo. Outro aspecto a ser ressaltado é que, além da maior qualidade ambiental alçada em razão da introdução de ventilação e iluminação naturais, dados de consumo energético registrados ao longo de uma década fazem da sede do Commerzbank uma das maiores referências de desempenho ambiental para um edifício de escritórios no nível mundial (GONÇALVES; BODE, 2015).



Figura 19. Vista externa do edifício.

Fonte: Foster e Partners (2005).

Dados principais a respeito do projeto:

- Localização: Frankfurt am Main; latitude 50°N.
- Cliente: Commerzbank
- Arquitetos: Foster and Partners
- Projeto estrutural: Ove Arup and Partners International, Londres

- Projeto de sistemas prediais: Roger Preston and Partners
- Usos: escritórios e comercial
- Número de pavimentos: 53
- Altura: 258 metros
- Área total construída do complexo multiuso: 100 mil m²
- Conclusão da obra: 1997

O edifício sede do banco Commerzbank está situado no distrito financeiro de Frankfurt. A torre principal nasce do centro de uma quadra central da cidade, que tem edifícios periféricos de 6 a 7 pavimentos. Esses edifícios são voltados para o uso comercial (lojas, estacionamento de carros) e residencial (apartamentos).

A cidade de Frankfurt tem um clima temperado com invernos frios (temperaturas que podem chegar a -10°C) e verões mais quentes, podendo atingir temperaturas acima de 30°C. Na informação climática do Meteonorm 6.1 (METEOTEST, 2009) é possível notar que a temperatura média de janeiro (inverno) é 1°C e de agosto (verão) é 18,7°C. A umidade relativa média anual é de 77% e ela é mais alta nos meses de inverno.

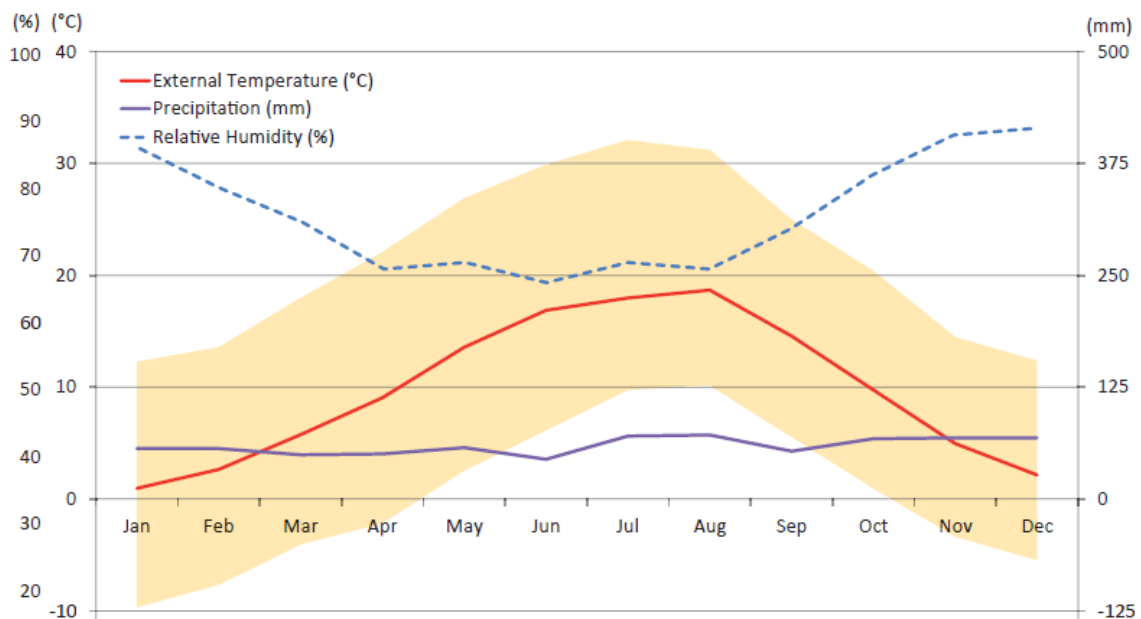


Figura 20. Clima de Frankfurt.

Fonte: Adaptado de Meteonorm 6.1 (METEOTEST, 2009).

A forma do edifício foi desenvolvida, em grande parte, como resposta à regulamentação alemã que define que todas as estações de trabalho não devem estar localizadas a uma distância maior que 7,5 m das janelas, para que se tenha acesso à luz natural. A planta tipo da torre tem formato triangular (Figura 21), com os núcleos de serviços localizados nas extremidades da planta (nos vértices), permitindo assim que o centro da planta fique desobstruído, para melhor posicionamento de um átrio que auxilia a potencializar a ventilação natural por efeito chaminé. Nas áreas de escritório, as plantas são estreitas e os terraços laterais são ocupados por jardins (sky-gardens), que garantem que todos os ambientes tenham acesso à luz natural, além de contar com janelas com possibilidade de abertura. A planta típica é dividida em três zonas ambientais de acordo com a estratégia de ventilação utilizada: a zona externa voltada para fachadas externas, a zona interna voltada para o átrio e a zona intermediária, que está localizada entre as duas outras zonas. Enquanto as zonas externas e internas são mais utilizadas para as estações de trabalho, a zona intermediária abriga os corredores e as salas de reunião (GONÇALVES; UMAKOSHI, 2010).

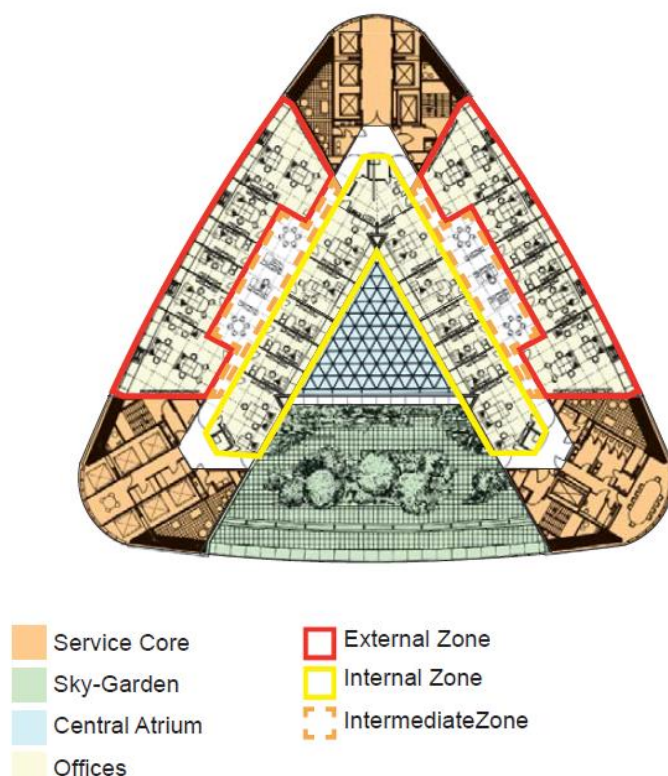


Figura 21. Planta tipo com separação das zonas de trabalho.
Fonte: Lee (2011).



Figura 22. Vista dos escritórios voltados para os terraços laterais.
Fonte: Foster e Partners (2005).

O edifício é dividido verticalmente em três “vilas de escritório”, cada uma composta por 12 pavimentos e 3 terraços laterais de 4 pavimentos (sky-gardens), que são espaços colaborativos que também exercem a função de criar uma ampla comunicação entre as áreas internas e a paisagem externa. É importante notar que cada um dos terraços está voltado para uma orientação do edifício (rotacionado a cada 120°) e o átrio central conecta-os, permitindo que em todas as direções de vento o fluxo de ar seja cruzado (diferencial de pressão dinâmica) e ascendente (pressão estática), caracterizando um sistema em que o movimento de ar é resultante de uma combinação de efeito chaminé com a ação dos ventos, conforme ilustrado na Figura 23. Outro aspecto relevante do projeto é que cada “vila” é separada por uma estrutura metálica com fechamento em vidro, que tem o objetivo de bloquear velocidades muito acentuadas de vento, mas que permite a passagem de luz natural aos pavimentos inferiores como pode ser visto na Figura 24.

As janelas dos terraços laterais são controladas por um sistema de automação predial (BMS), tendo a abertura ou o fechamento acionados de acordo com as informações climáticas fornecidas pela estação meteorológica existente no prédio. As janelas são fechadas quando a velocidade do vento excede 9 m/s. No inverno as janelas são fechadas quando a temperatura externa é inferior a 5°C e um sistema de

aquecimento sob o piso é ativado para proteger a vegetação presente nos terraços. É importante mencionar que as janelas dos escritórios voltados para o átrio central podem ser operadas manualmente e ser abertas durante todos os dias e condições climáticas ao longo do ano.

Já a fachada dos escritórios voltados para a face externa conta com uma pele dupla de vidro que é composta por uma veneziana integrada e um painel de vidro externo cuja função é bloquear o vento excessivo (em inglês é chamado de “wind shield”). Como demonstrado na Figura 25, o painel externo tem uma abertura que permite ao ar externo entrar na cavidade da janela, evitando também que as chuvas fortes conflitem com a possibilidade de abertura de janelas. A persiana está localizada na cavidade, funcionando como um sistema de proteção externo, bloqueando os ganhos de calor solar antes de estes entrarem em contato com a face interna (vidro) do componente de fachada.

Vale ressaltar que, apesar de o controle individual das janelas internas e das persianas ser permitido, existe um sistema de automação (BMS) que aciona as persianas de acordo com a orientação solar para evitar o superaquecimento, e fecha as janelas quando as velocidades externas de vento atingem 15 m/s. De acordo com Jenkins (2007), esse sistema de fachada permite que os escritórios possam ser naturalmente ventilados por 80% do ano.

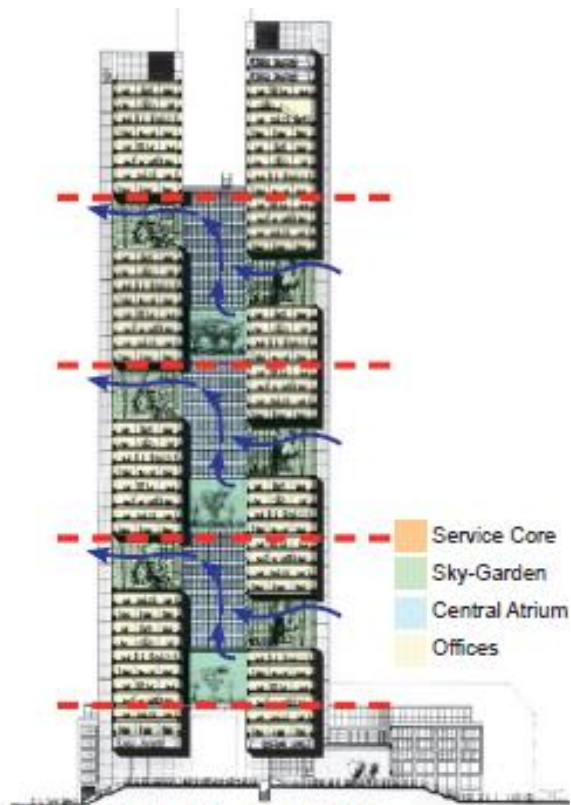


Figura 23. Corte demonstrando a separação das “vilas” de 12 pavimentos.
 Fonte: Lee (2011).

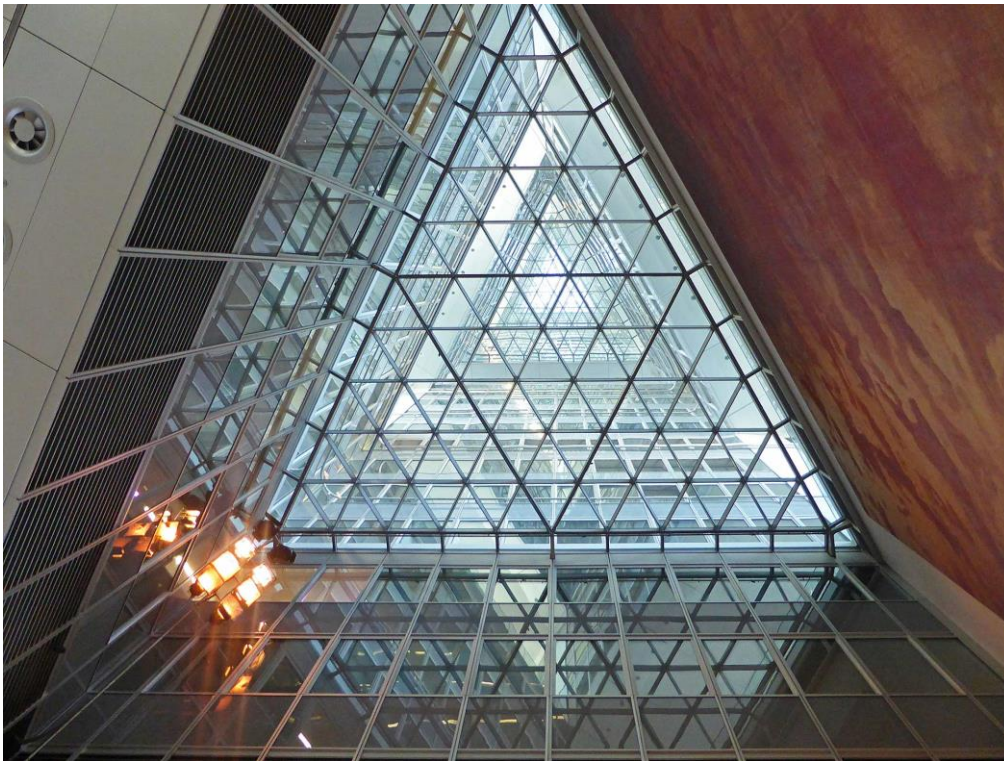


Figura 24. Foto demonstrando o fechamento de vidro nos átrios separando as “vilas” de 12 pavimentos.
 Fonte: Wikimedia Commons (2012).

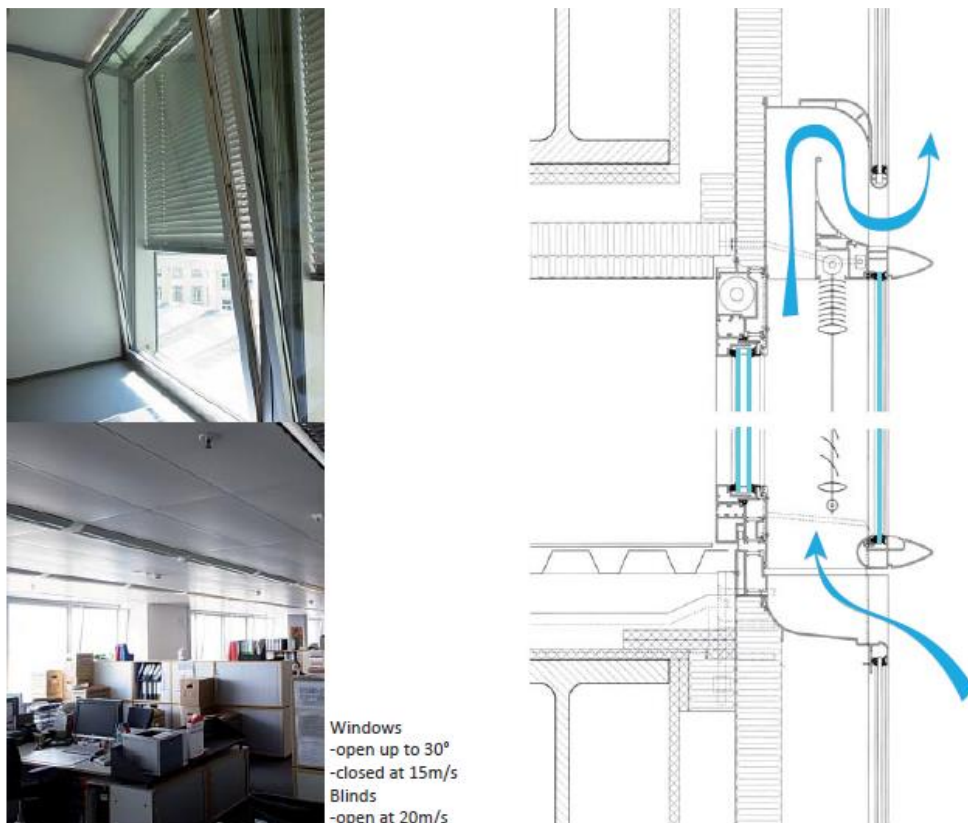


Figura 25. Fotos e detalhes da fachada dupla.

Fonte: Lee (2011).

2.1.1 Desempenho ambiental do edifício: como a ventilação natural impacta no desempenho térmico

Para melhor entendimento a respeito do funcionamento do edifício em operação, Lee (2011) realizou medições de temperatura e velocidade do ar no interior da terceira “vila de escritórios” ao longo de dois dias no mês de julho, que segundo as informações climáticas está entre os meses mais quentes do ano. Os dispositivos de medição foram instalados nos pavimentos 31, 38 e 42, conforme demonstrado na Figura 26. As áreas de foco das medições foram: escritório, átrio e terraço, conforme demonstrado na Figura 27.

No primeiro dia de medição a temperatura externa (medida pela estação meteorológica instalada na cobertura do prédio) variou entre 24°C e 29°C (Figura 28), ao passo que no terraço e no átrio a temperatura não ultrapassou os 26°C durante todo o dia, comprovando o efeito de mediação climática exercido pelo terraço lateral. A única medição que fugiu um pouco do padrão foi no terraço mais alto, no período após as 18h, quando a temperatura subiu até 28°C em razão da radiação solar direta

recebida na orientação nordeste. É importante mencionar que, no primeiro dia, os três terraços permaneceram abertos, possibilitando maior efetividade na ventilação natural tanto na “vila” como nos escritórios voltados para ela. Adicionalmente, como consequência da mediação proporcionada pelo terraço, os escritórios mantiveram temperaturas estáveis entre 24°C e 25°C.

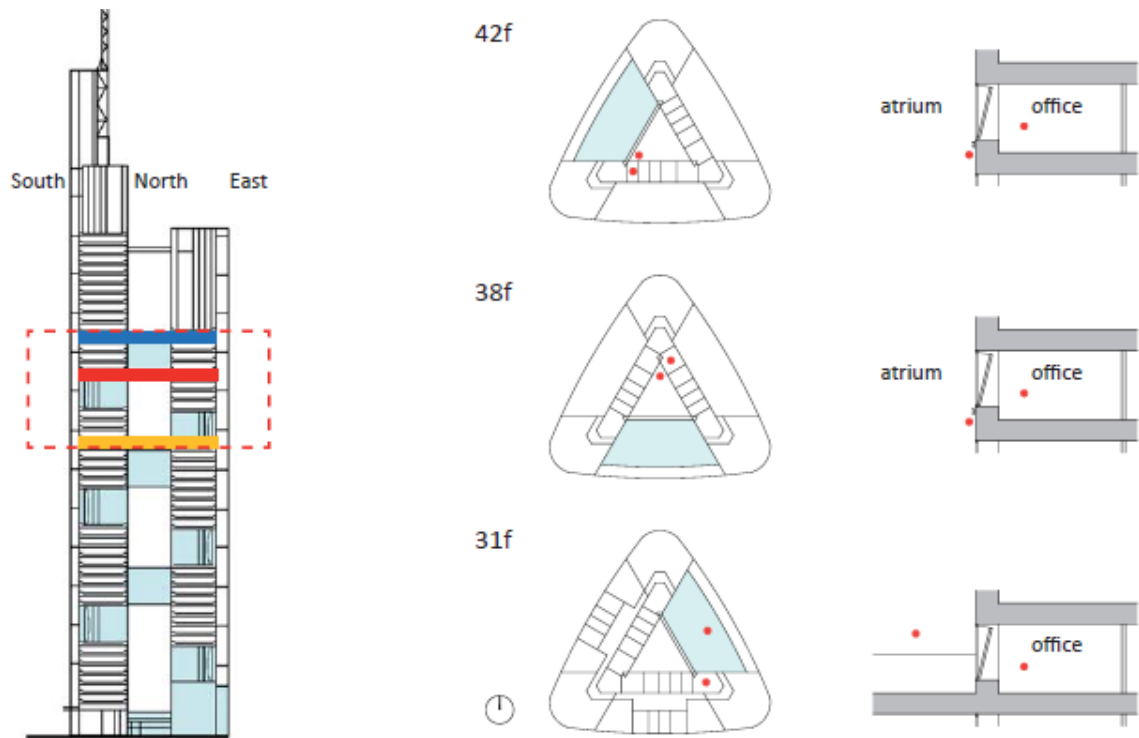


Figura 26. Localização dos pontos de medição de temperatura no interior da terceira “vila de escritórios”, incluindo um ponto no primeiro terraço da vila (voltado para o nordeste), dois pontos no átrio (sul e noroeste) e um ponto em três escritórios diferentes.

Fonte: Lee (2011).



Figura 27. Localização de três dos data loggers de medição, com uma indicação no terraço, uma no átrio e uma em um dos escritórios.

Fonte: Lee (2011).

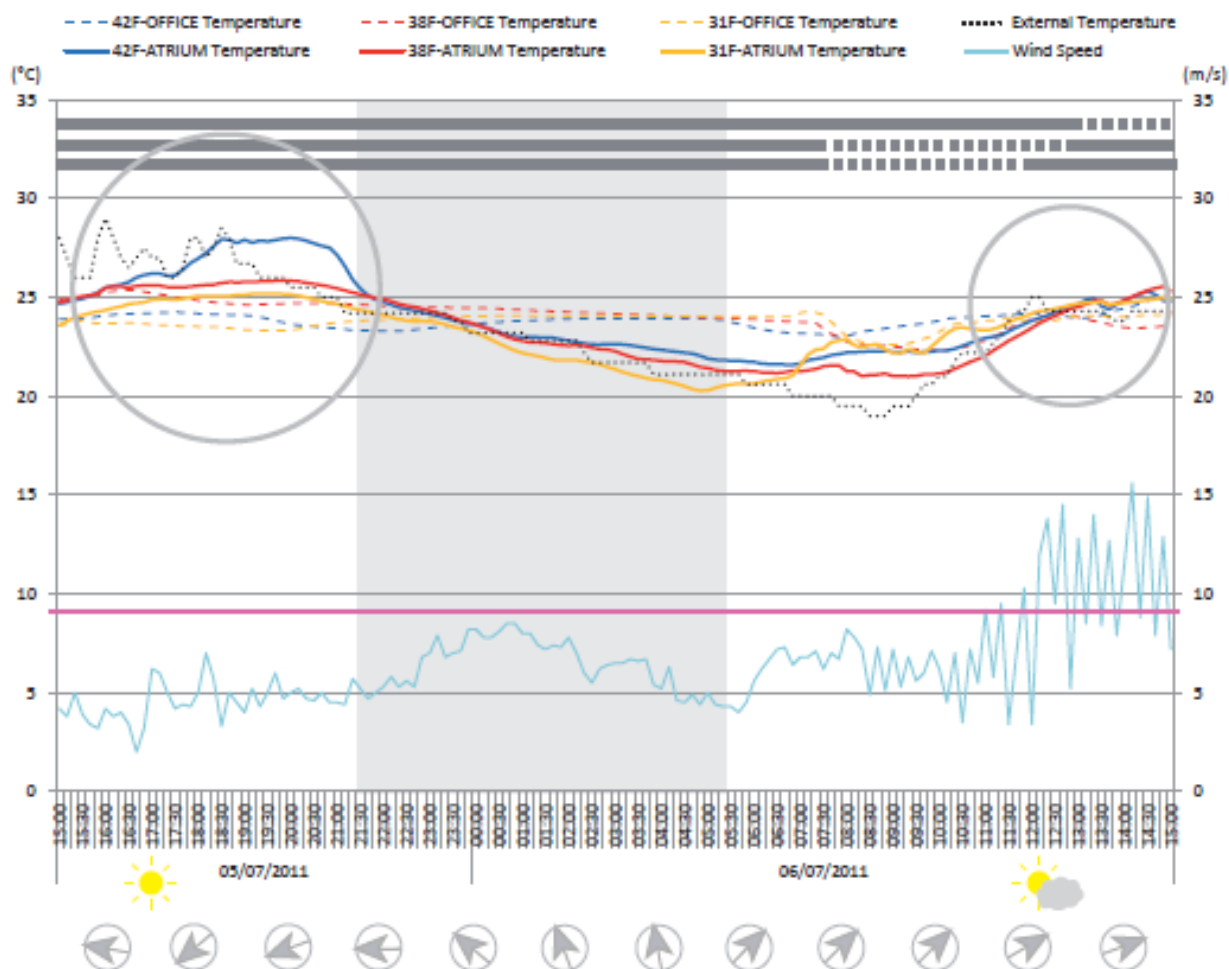


Figura 28. Gráfico de temperaturas do ar registradas nos dois dias de medição, no terraço, no átrio e nos escritórios.

Fonte: Lee (2011).

Já no segundo dia de medição, as temperaturas do átrio excederam as temperaturas externas após as 12h30. Isso ocorreu pois, em razão dos ventos fortes (acima de 9 m/s), as janelas do terraço sul e nordeste foram fechadas pelo sistema de automação. Na Figura 28 a linha cinza representa a operação de janelas nos escritórios adjacentes ao átrio (as linhas tracejadas representam quando as janelas estão abertas). Com relação à eficácia do sistema de ventilação natural, as medições comprovaram que a ventilação por efeito chaminé ao longo do átrio central é mantida com a abertura das janelas contidas nos terraços em orientações opostas. A velocidade de vento no terraço mais elevado chegou a 1,9 m/s (Figura 29).

No que tange à operação das janelas dos escritórios, notou-se que, apesar de as medições terem sido feitas em um período curto de tempo, os usuários

demonstraram fazer uso consciente das aberturas, fechando-as quando a temperatura do átrio estava mais quente do que os escritórios e abrindo-as quando a temperatura estava mais baixa.

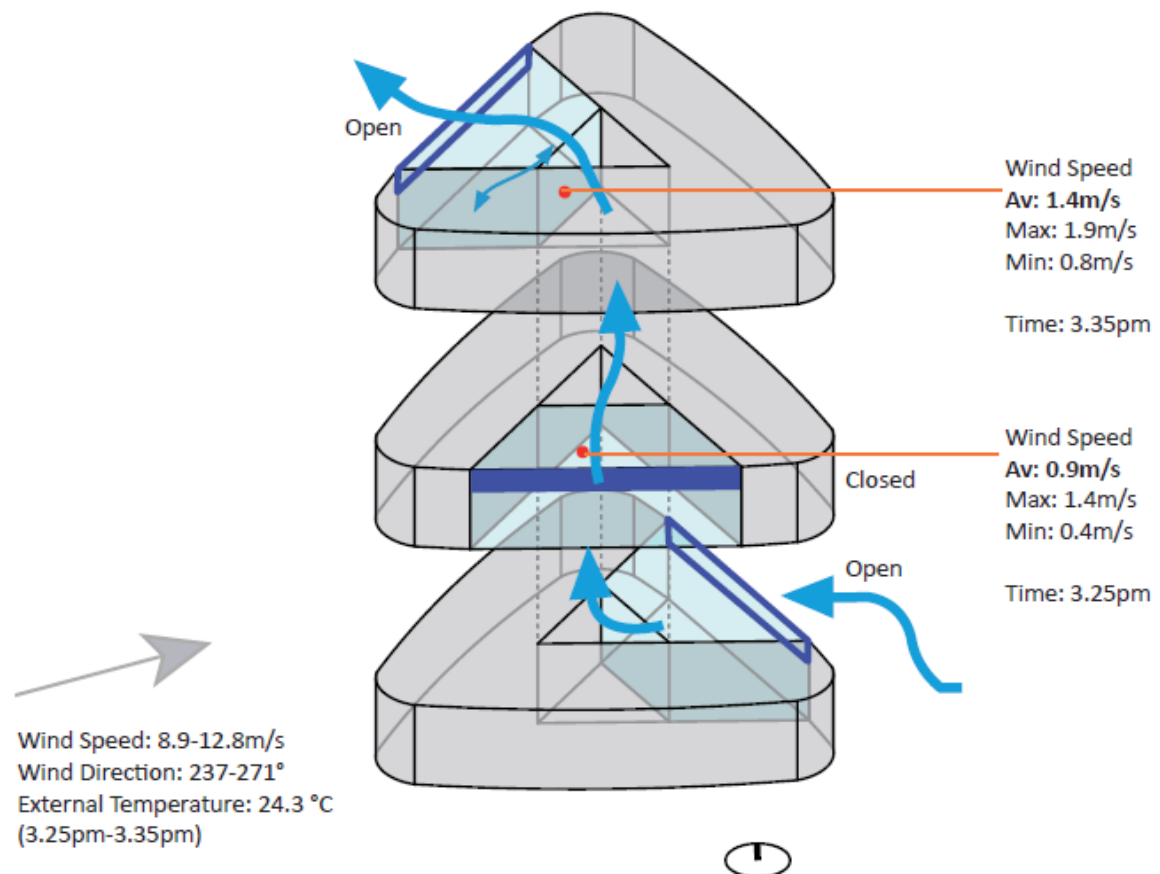


Figura 29. Desenho esquemático da terceira “vila de escritórios”, com a indicação de medições da velocidade do vento em diferentes pontos. O esquema mostra o fechamento da abertura do terraço voltado para o vento predominante.

Fonte: Lee (2011).

2.1.2 Considerações finais

Foram realizadas análises, comparando o consumo energético do edifício ao longo de dez anos com as metas alemãs de desempenho ambiental de edificações (GOLÇALVES; UMAKOSHI, 2010). Constatou-se que o Commerzbank teve uma excelente performance, com consumo anual de energia sempre abaixo dos valores de referência estabelecidos. Esses resultados confirmam que a ventilação e a iluminação naturais podem proporcionar, além de ganhos qualitativos de

produtividade e bem-estar aos usuários, uma redução no impacto ambiental do edifício por meio de menor consumo energético.

O bom desempenho ambiental do edifício deve-se fundamentalmente a soluções arquitetônicas simples e bem resolvidas que aplicam de forma correta os princípios físicos da ventilação e iluminação naturais. Os sistemas prediais integrados e usuários preparados para um ambiente de trabalho diferenciado (com menos dependência dos sistemas de climatização ativa) também contribuíram para o Commerzbank se tornar um ícone, restabelecendo a cultura dos ambientes de escritório com ventilação natural, onde as oscilações de temperatura do ar têm maior aceitação dos ocupantes.

Outro aspecto revelado pela pesquisa realizada por Lee (2011) é que os usuários interagem com o edifício de forma a restabelecer seu conforto térmico por intermédio da abertura de janelas e do controle de persianas. Esta postura dos usuários é fundamental para que as estratégias passivas de projeto possam ser efetivas na prática.

2.2 EDIFÍCIO 30th ST. MARY AXE

O edifício que foi projetado para ser sede da empresa Swiss Re em Londres foi concebido para ser um ícone arquitetônico. Sua forma aerodinâmica também contribui para um melhor desempenho ambiental, reduzindo os ventos fortes indesejáveis provenientes de turbulência no entorno imediato do edifício (fenômeno comum em prédios altos). Além disso, a forma cilíndrica reduz o impacto de sombreamento nos prédios adjacentes, proporcionando maior acesso a luz natural/radiação solar. É importante ressaltar que na concepção do projeto foi incorporado um complexo sistema de ventilação natural para os escritórios, utilizando átrios localizados no perímetro da planta tipo, sendo este o principal fator de adesão com o embasamento teórico desta pesquisa.



Figura 30. Foto aérea do edifício 30th St. Mary Axe.
Fonte: Wood e Salib (2013).

Dados principais a respeito do projeto:

- Localização: Londres, Reino Unido; latitude 52°N
- Cliente: Swiss Re
- Arquitetos: Foster and Partners
- Uso: escritórios

- Número de pavimentos: 41
- Altura: 180 metros
- Área total construída do complexo: 76,4 mil m²
- Conclusão da obra: 2004

O edifício está localizado no coração do distrito financeiro de Londres, compondo um agrupamento de prédios altos localizados naquela região da cidade, sendo esse o primeiro edifício alto com uma abordagem ambiental de projeto.

O clima de Londres é temperado marinho, que é caracterizado por mudanças suaves de temperatura entre as estações, com ocorrências raras de eventos climáticos extremos. Em geral o inverno é frio e o verão moderadamente quente. De acordo com a informação climática do software Meteonorm 6.1 (METEOTEST, 2009) a temperatura média no inverno é de 6,2°C e de 17,9°C no verão. Isso também pode ser verificado na Figura 31. Ademais, a temperatura mais alta medida em um período de dez anos (1996–2005) foi de 29,7°C.

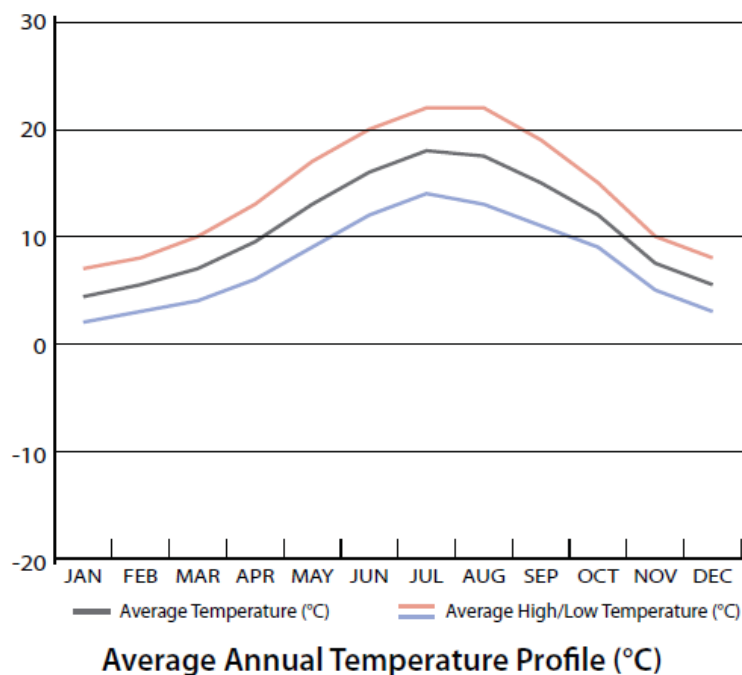


Figura 31. Gráfico demonstrando a temperatura média anual em Londres.
Fonte: Adaptado de Meteonorm. 6.1 (METEOTEST, 2009).

O edifício contém plantas tipo de dimensões variadas, sendo que no primeiro pavimento tem 50 m de diâmetro, aumentando para 57 m nos pavimentos subsequentes e reduzindo-se nos pavimentos mais próximos do topo.

2.2.1 Desempenho ambiental do edifício

Além da forma da edificação, a característica mais importante do ponto de vista ambiental são os átrios espirais que estão acoplados aos jardins e abrangem toda a altura do edifício. Os átrios são divididos em grupos de seis pavimentos e, além de proporcionar maior qualidade espacial interna em razão das vistas internas, conectando diversos pavimentos, eles foram projetados de forma a potencializar a ventilação natural por meio de uma combinação entre ventilação cruzada e efeito chaminé. Na simulação de CFD demonstrada na Figura 32, verifica-se que, nas áreas mais altas do átrio, a pressão negativa é maior e esse diferencial de pressão ocasiona em um incremento do movimento de ar. É importante notar também que toda a fachada da edificação é composta por duas peles de vidro, ventiladas por meio das aberturas ao longo dos átrios periféricos (Figura 33). Além disso, o prédio também conta com um sistema de climatização artificial que está conectado a um sistema de BMS, que controla o acionamento do sistema de aquecimento ou resfriamento dependendo das temperaturas externas, configurando uma operação em modo misto.

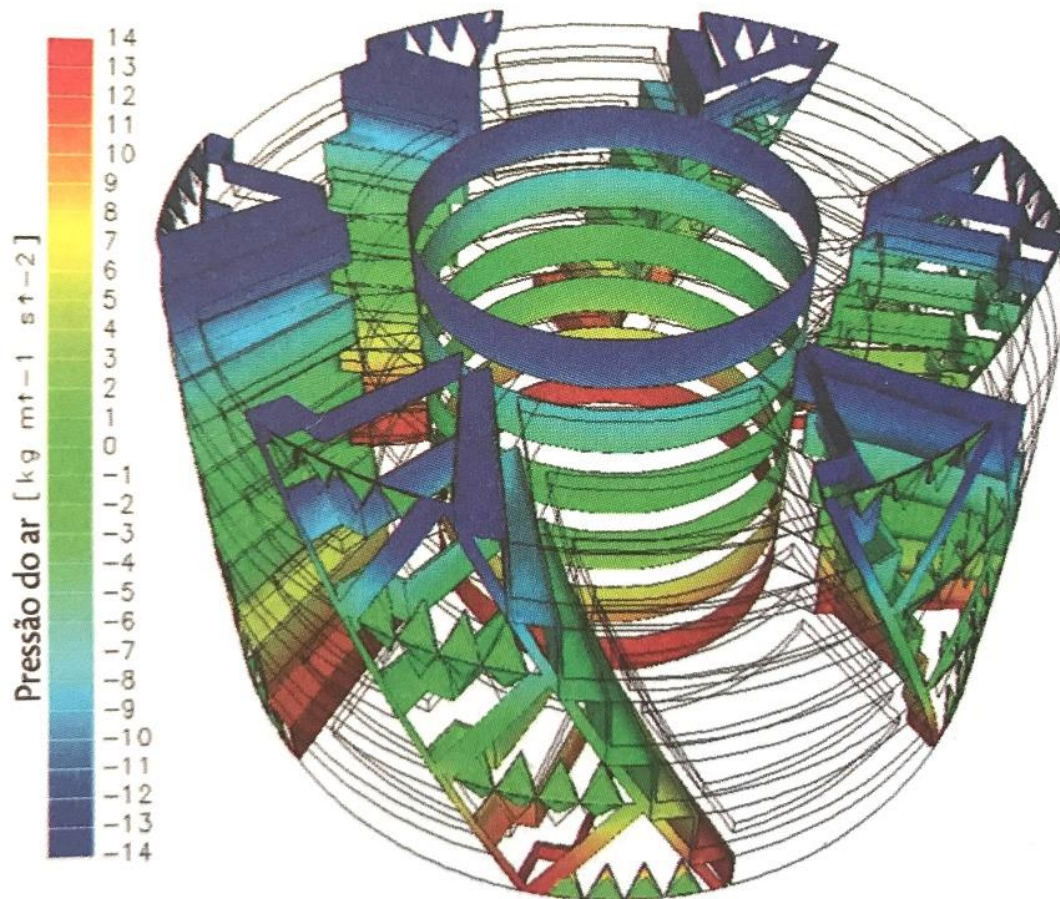


Figura 32. Perspectiva e planta de uma das “vilas” de seis pavimentos, modelada para a avaliação da eficiência da ventilação natural, por meio de simulação computacional de dinâmica de fluidos. A variação de cores corresponde a diferenças no coeficiente de pressão ao longo das paredes internas, estando os valores positivos relacionados à entrada de ar pela parte inferior do átrio de seis pavimentos, e os valores negativos relacionados à saída de ar pela parte superior do átrio.

Fonte: BDSP Partnership (1998).



Figura 33. Vista da fachada demonstrando as janelas do átrio abertas.
Fonte: Foster e Partners (2005).

A planta de cada pavimento recebe maior acesso à luz natural em decorrência do seu formato irregular semelhante a uma estrela, no qual a área de perímetro da planta é aumentada em razão dos vazios, conforme pode ser visto na Figura 34. Adicionalmente o layout interno foi objeto de análise por parte da equipe de avaliação ambiental (BDSP PARTNERSHIP, 1998), que constatou que o layout celular oferece a possibilidade de períodos mais longos de utilização de ventilação natural quando comparado ao *open plan*.

Em relação ao conforto térmico, foram realizadas previsões quanto à utilização de ventilação natural, variando entre 40,8% e 75,9% das horas de ocupação anual. Os valores finais de utilização da ventilação natural vão depender das variações do clima externo, da tolerância em relação às normas de conforto térmico e do layout interno. Por exemplo, se a temperatura de 24°C for adotada com o limite máximo de conforto, o percentual máximo anual de utilização de ventilação natural será de 41% para o layout *open plan* e de 47,5% para o layout celular. No entanto, quando adotada a temperatura de 26°C como limite máximo, o percentual de utilização de ventilação natural sobe para 66,2% no layout *open plan* e para 75,6% no layout celular. Vale lembrar que o CIBSE (2019) só considera temperaturas de superaquecimento nas

horas que excedem 28°C. Dessa forma, se a temperatura interna máxima fosse considerada 28°C, provavelmente os escritórios poderiam operar com ventilação natural durante quase todas as horas de ocupação anual.

No que tange ao desempenho energético do edifício, as simulações computacionais constataram uma redução anual de 30-50 kWh/m², em relação ao consumo total de 250 kWh/m²/ano, típico de um edifício de escritórios que opera o ano todo com climatização artificial em Londres (GOLÇALVES; UMAKOSHI, 2010).

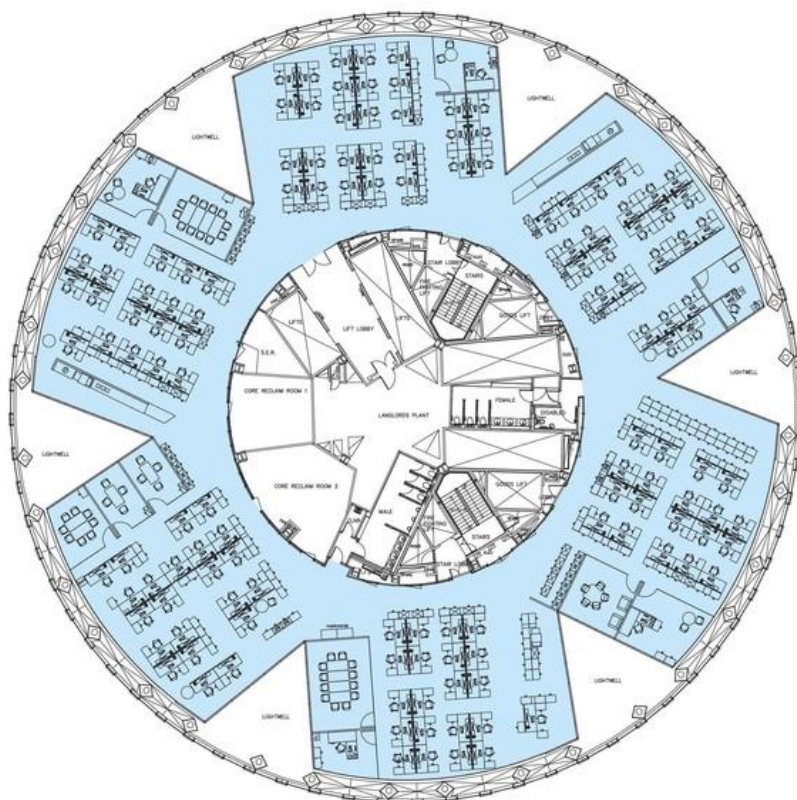


Figura 34. Planta tipo layout.
Fonte: Foster e Partners (2005).

2.2.2 Considerações finais

A análise técnica do edifício 30th St. Mary Axe demonstra a importância de uma maior aceitação em relação ao conceito de conforto adaptativo, que permite que usuários tenham maior tolerância com variações climáticas e temperaturas internas um pouco mais elevadas (28°C por exemplo). Caso temperaturas mais elevadas fossem aceitas, seria possível reduzir significativamente o consumo energético do edifício. Outro aspecto que poderia contribuir para a redução do consumo energético

seria o uso de dispositivos de sombreamento externo. Simulações energéticas realizadas por Cotta (2012) demonstraram que, mesmo no clima de Londres, o sombreamento externo é fundamental nos meses de verão, para reduzir o superaquecimento dos edifícios de escritório.

O edifício foi concebido de forma a operar em modo misto, no entanto atualmente a climatização artificial é o único recurso utilizado para garantir o conforto térmico dos usuários. Uma das possíveis razões para a não utilização da ventilação natural, nem nos meses de temperaturas mais amenas, é a poluição do ar externo causada pelo tráfego intenso de veículos na região central de Londres. Vale ressaltar, no entanto, que o projeto arquitetônico tem uma virtude, pois tem a capacidade de se manter atual ao longo de décadas, possibilitando em um futuro próximo, quando os veículos se tornarem elétricos*, utilizar a ventilação natural com melhores qualidades do ar.

* O governo do Reino Unido estabeleceu como meta proibir a circulação de veículos que operam utilizando derivados de petróleo até 2030. E também estabeleceu a meta de todo o país ser neutro nas emissões de carbono até 2050.

Capítulo 3

CAPÍTULO 3. PESQUISA DE CAMPO: o caso do edifício Torre Cube em Guadalajara, México

O edifício de escritórios Torre Cube, localizado na cidade de Guadalajara, no México, foi escolhido para ser analisado como estudo de caso, por se tratar de um dos poucos exemplos de prédio de escritórios multipavimentos (localizado em cidade de clima quente) a operar durante a maior parte do ano utilizando ventilação natural. Entre suas principais características, o edifício conta com um átrio central que possibilita um sistema de ventilação que combina efeito chaminé com ventilação cruzada. Adicionalmente, todas as fachadas expostas são sombreadas e alguns pavimentos contam com varandas/terraços laterais que são espaços de transição para os usuários.



Figura 35. Foto externa do edifício.

Foto: Duccio Malagamba.

Dados principais a respeito do projeto:

- Localização: Guadalajara, México; latitude 20° 41' N e longitude 103° 20' W
- Cliente: Incorporadora Grupo Cube
- Arquiteta: Carmen Pinos
- Uso: escritórios
- Número de pavimentos: 17
- Altura: 60 metros
- Área total construída do complexo multiuso: 17.000,00 m²
- Conclusão da obra: 2005

3.1 CLIMA DE GUADALAJARA – MÉXICO

A cidade de Guadalajara está localizada em uma região de clima subtropical relativamente úmido, caracterizada por invernos secos com temperaturas moderadas e verões quentes e chuvosos. Apesar de a região apresentar temperaturas quentes ao longo de quase todo o ano, existe uma variação significativa na taxa de precipitação ao longo das estações (Figura 37). Vale ressaltar que as temperaturas normalmente chegam a 30°C nos meses de verão e em abril e maio podem alcançar 35°C com certa frequência. A temporada de chuvas inicia no fim de maio e normalmente traz uma umidade adicional, resultando em dias com temperaturas mais amenas.

Nos meses de inverno, a temperatura tende a ser moderada durante o dia (em média 25°C), no entanto durante a noite a temperatura se reduz rapidamente, podendo chegar a 5°C, conforme pode ser visto na Figura 36.

A Figura 38 demonstra que os ventos predominantes são de oeste e sudoeste, com velocidades de até 8 m/s.

Daily temperature

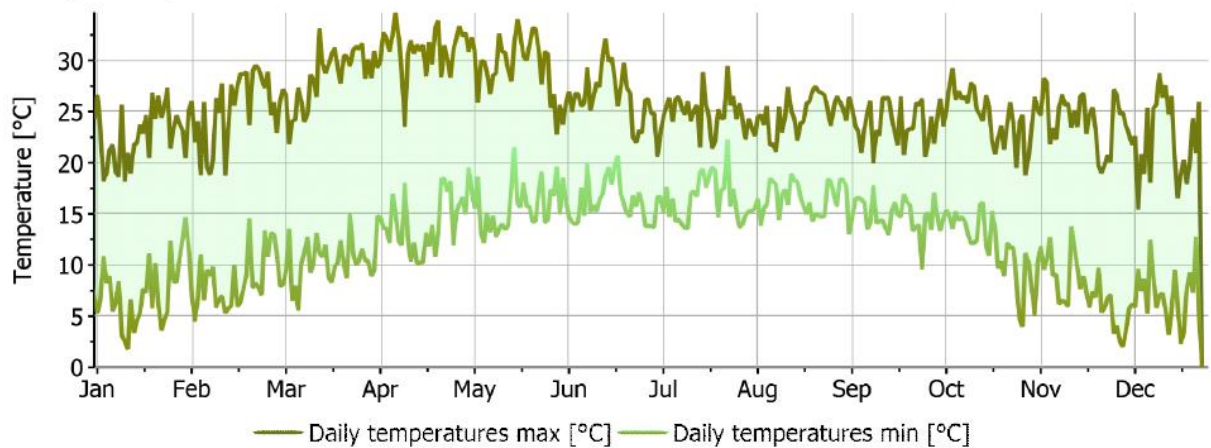


Figura 36. Gráfico demonstrando as temperaturas máximas e mínimas anuais.

Fonte: Adaptado de Meteonorm. 6.1 (METEOTEST, 2009).

Precipitation

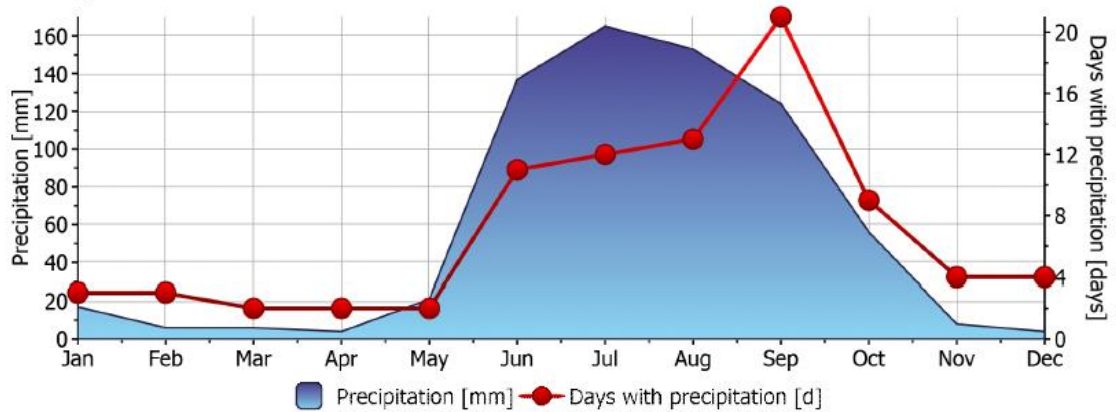


Figura 37. Gráfico demonstrando a precipitação anual. Fonte:

Fonte: Adaptado de Meteonorm. 6.1 (METEOTEST, 2009).

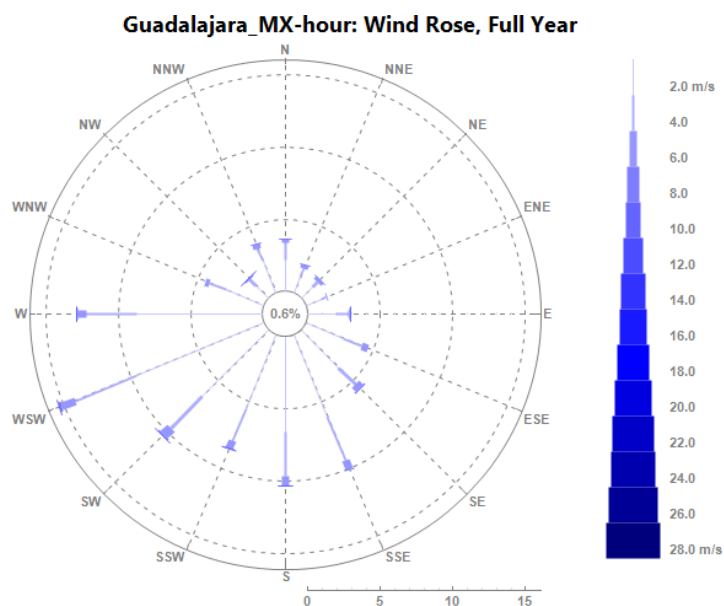


Figura 38. Rosa dos Ventos demonstrando a direção e a intensidade dos ventos predominantes.
Fonte: Adaptado de Meteoronorm. 6.1 (METEOTEST, 2009).

3.2 LOCALIZAÇÃO DO EDIFÍCIO

O edifício está localizado no distrito de Zapopan, e tem em seu entorno diversos edifícios mais altos, que foram construídos posteriormente, após alteração na lei de uso e ocupação do solo.

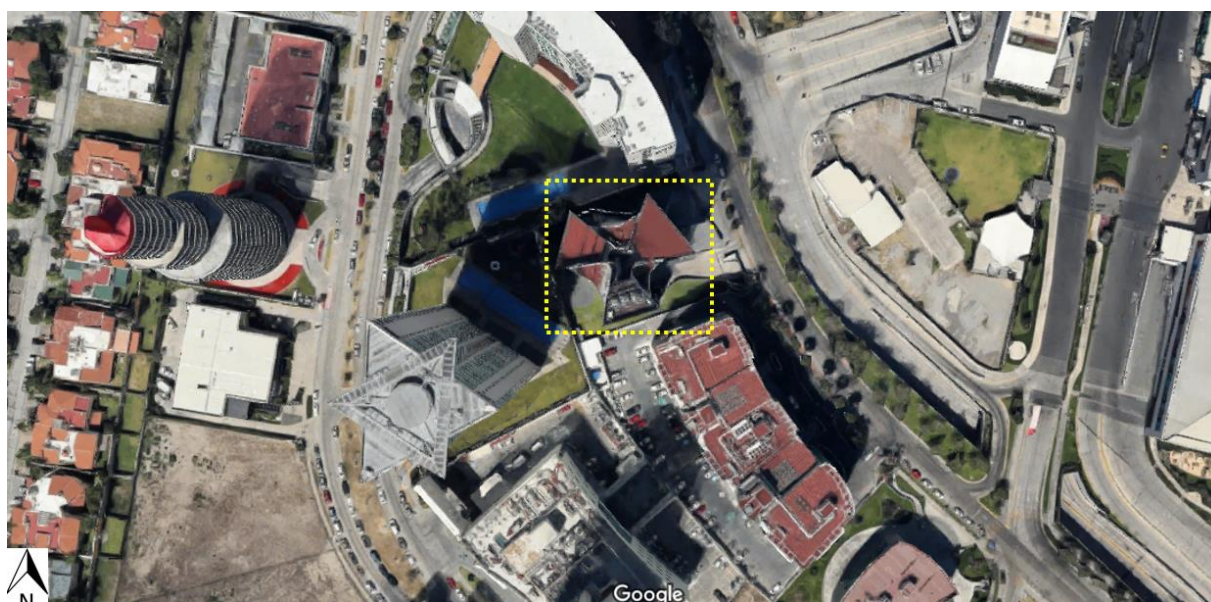


Figura 39. Imagem aérea demarcando a localização do edifício em seu entorno imediato.
Fonte: Google Earth (2020).

3.3 CONCEITO ARQUITETÔNICO DO EDIFÍCIO

O edifício é composto por três blocos em formato afunilado que estão suspensos em balanço, sendo apoiados somente pelos núcleos de escadas e elevadores, conforme pode ser verificado na planta tipo demonstrada na Figura 40. Cada um desses blocos varia em tamanho (entre 105 e 175 m² em área útil de piso). Além de serem elementos estruturais e de circulação vertical, os núcleos de serviços abrigam também os banheiros, permitindo que as lajes dos blocos sejam desobstruídas de obstáculos como pilares e colunas. A profundidade máxima das plantas dos escritórios é 12 m, com aberturas para o vazio central e para as fachadas externas. Vale ressaltar que os blocos são revestidos por brises-soleil de madeira, que sombreiam as fachadas externas das áreas de trabalho.

A entrada do prédio está voltada para a fachada nordeste, onde uma grande escadaria dá acesso a uma praça no terceiro pavimento, que abriga o lobby. Os escritórios e núcleos de serviços estão dispostos ao redor de um vazio central (aberto na cobertura), que além de funcionar para incremento da iluminação natural, também exerce importante função na estratégia de ventilação natural dos ambientes de trabalho. Além de ser aberto na cobertura, o vazio central também está conectado ao exterior por meio de varandas/terraços laterais, conforme pode ser visto na Figura 41.

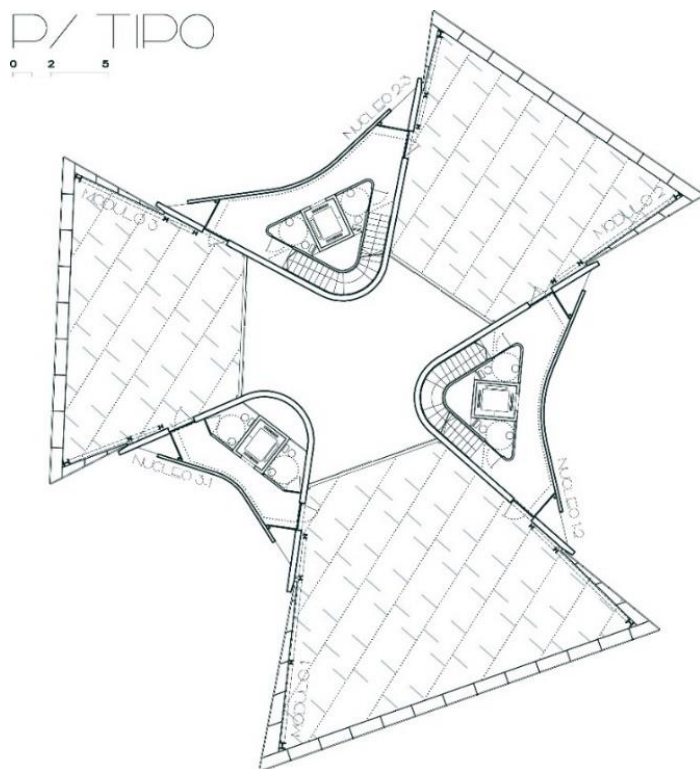


Figura 40. Planta do pavimento tipo.
Fonte: Estúdio Carmen Pinos.

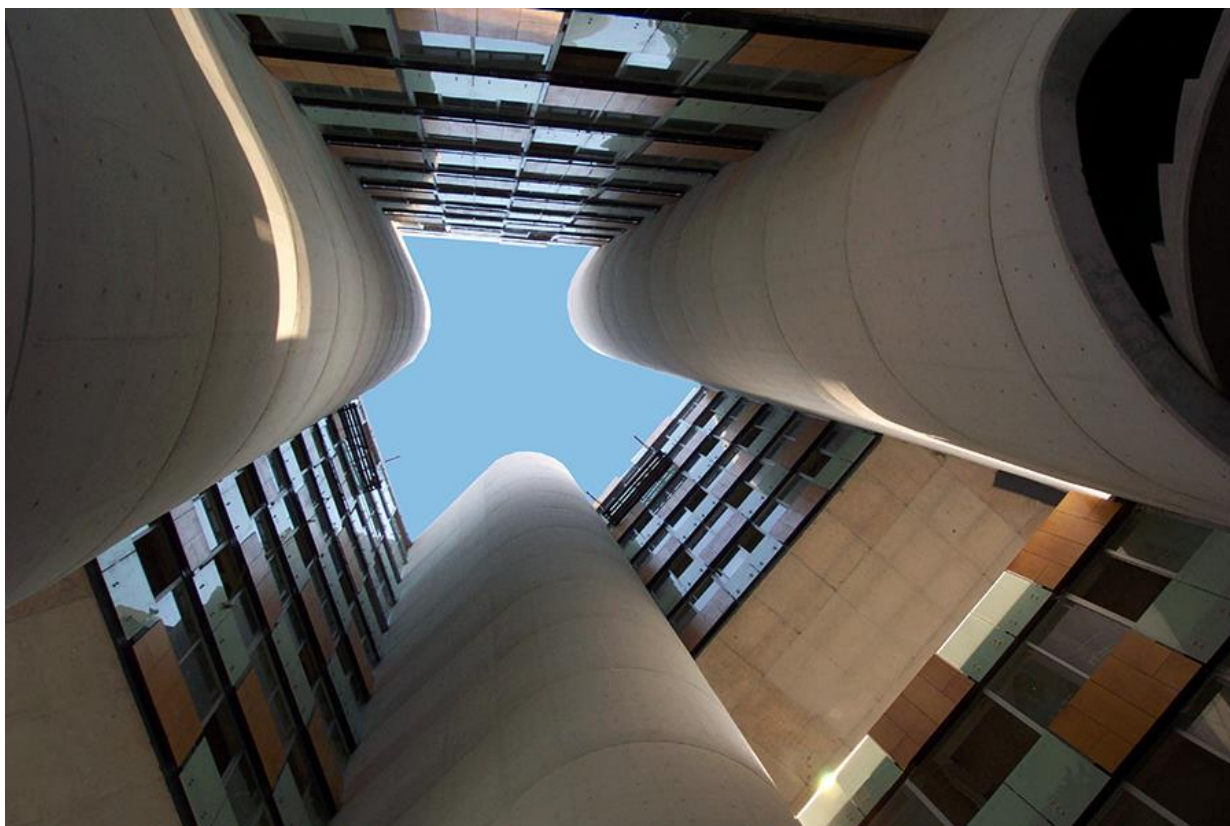


Figura 41. Foto do vazio central.
Foto: Duccio Malagamba.

3.4 DESEMPENHO AMBIENTAL DO EDIFÍCIO

O clima moderado de Guadalajara possibilita a aplicação de ventilação natural durante a maior parte do ano. Além disso, o edifício conta com estratégias projetuais que buscam reduzir as temperaturas internas ao máximo e adicionalmente potencializar o fluxo de ar nos espaços de trabalho. Um exemplo disso é a aplicação de sombreamento em todas as fachadas expostas e também a possibilidade de se ter ventilação cruzada em escritórios cujas plantas respeitam as proporções adequadas de profundidade para um bom desempenho térmico.

Ainda sobre a ventilação natural, as fachadas externas contam com portas de vidro de correr com grandes aberturas (Figura 42), que potencializam ainda mais o fluxo de ar nas áreas de trabalho. Além disso, os brises de madeira são móveis (podem correr horizontalmente), fornecendo aos usuários algum grau de flexibilidade para controlar o fluxo de ar dentro dos escritórios (já que, quando estão fechados, obstruem parcialmente o vento).

Com relação ao átrio central do edifício, a Figura 43 demonstra por meio de diagramas que o vazio localizado no interior da planta tipo tem o potencial de proporcionar um efeito combinado de ventilação por ação dos ventos com efeito chaminé. Vale ressaltar que, apesar de os blocos de escritório estarem conectados ao mesmo átrio central, eles estão dispostos em três direções variáveis e cada um deles pode ter um desempenho diferente, dependendo da direção do vento incidente no momento.



Figura 42. Foto das portas de vidro de correr e da fachada externa vista dos escritórios.
Foto: Duccio Malagamba.

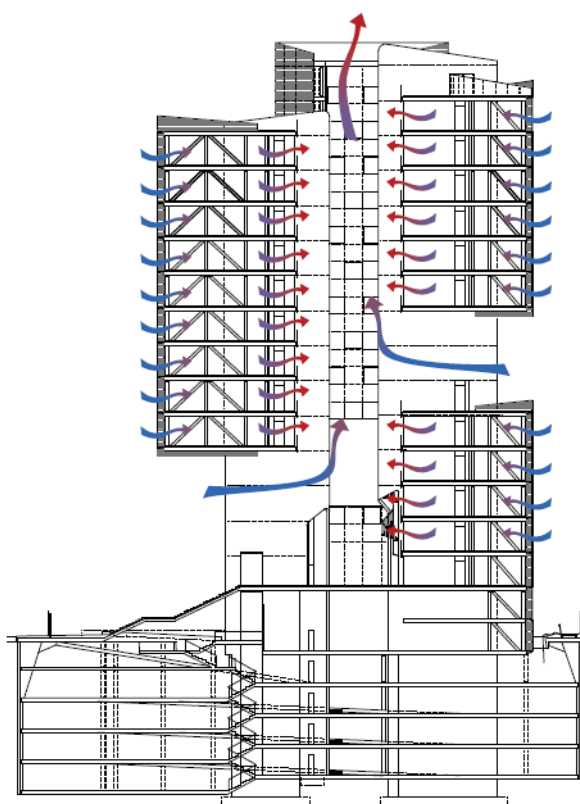


Figura 43. Corte esquemático demonstrando uma hipótese do funcionamento da ventilação natural.
Fonte: Wood e Salib (2013).

3.5 SIMULAÇÕES TÉRMICAS

3.5.1 Metodologia das simulações térmicas

Nesta etapa do trabalho foram realizadas simulações térmicas utilizando o software EDSL TAS versão 9.4.1. Como método de trabalho, as seguintes etapas foram cumpridas antes de realizar as simulações:

- Criação de um modelo com as características semelhantes ao edifício existente (Figura 44).
- Definição das zonas a serem simuladas nas áreas de trabalho (Figura 44).
- Inserção dos dados construtivos da edificação com seus respectivos Valores U (vidros, lajes, fachadas).
- Inserção dos dados de ocupação: ganhos de calores internos (W), horários de ocupação (Figura 45).
- Inserção dos dados climáticos, extraídos da base de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) 2012, no formato epw.

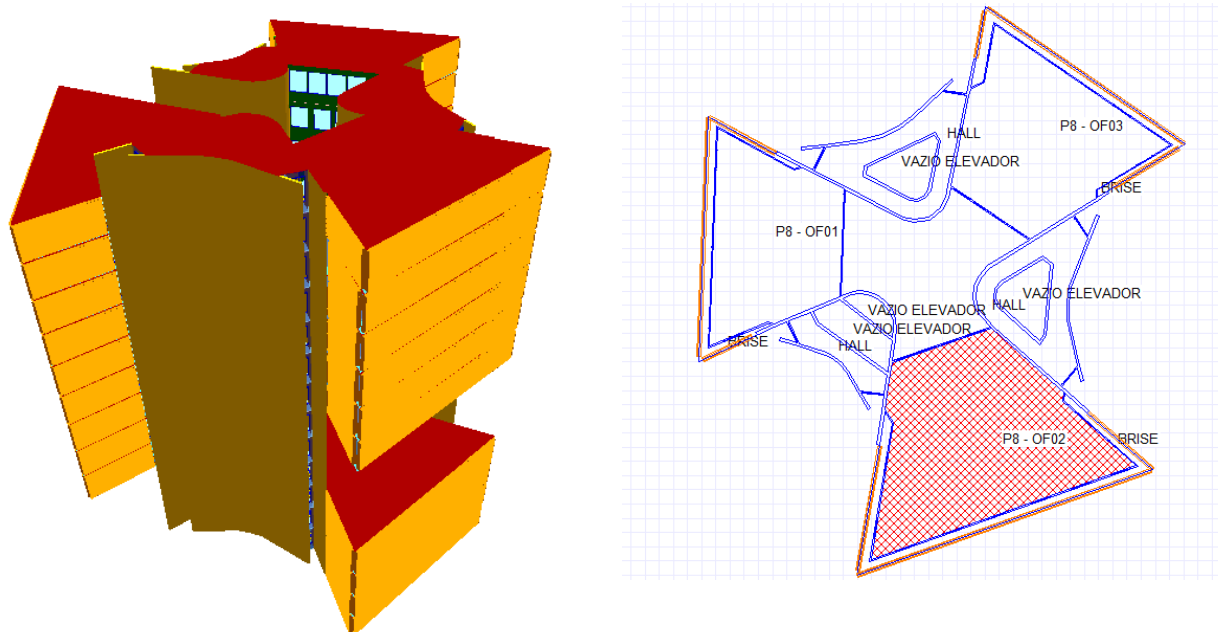


Figura 44. Modelo desenvolvido para simulações térmicas e definição de zonas para as áreas de trabalho.

Fonte: EDSL TAS, 2018.

The screenshot shows the 'Internal Gain' tab in the EDSL TAS software. It contains several input fields and a table of gain data.

Name: Basic office gains 37W/m2 total
Description: Basic office weekdays only

Radiant Proportion:
 Lighting: 0.3 (0-1)
 Occupant: 0.2 (0-1)
 Equipment: 0.1 (0-1)

View Coefficient:
 Lighting: 0.49 (0-1)
 Occupant: 0.227 (0-1)
 Equipment: 0.372 (0-1)

Gain	Value	Factor	Setback Value	Schedule
Infiltration	0.3 ach	1.0	0.3 ach	Office 8am to 6pm ...
Ventilation	0.0 ach	1.0	0.0 ach	
Lighting Gain	12.0 W/m ²	1.0	0.0 W/m ²	Office 8am to 6pm ...
Occupancy Sensible Gain	10.0 W/m ²	1.0	0.0 W/m ²	Office 8am to 6pm ...
Occupancy Latent Gain	5.0 W/m ²	1.0	0.0 W/m ²	Office 8am to 6pm ...
Equipment Sensible Gain	15.0 W/m ²	1.0	0.0 W/m ²	Office 8am to 6pm ...
Equipment Latent Gain	0.0 W/m ²	1.0	0.0 W/m ²	Office 8am to 6pm ...
Pollutant Generation	0.0 I(CO ₂)/hr/m ²	1.0	0.0 I(CO ₂)/hr/m ²	

System Parameters:
 Metabolic rate: 120.0 W/p
 DHW: 0.0 l/d/m²
 Outside Air: 8.0 l/s/p
 Target Room Illuminance: 0.0 lx

Figura 45. Planilha de inserção de dados de ocupação.

Fonte: EDSL TAS, 2018.

3.5.2 Simulação térmica: apresentação dos resultados

As simulações térmicas foram realizadas para todos os pavimentos do edifício, no entanto, para facilitar a análise dos resultados, foram selecionados três blocos de escritórios em pavimentos distintos (4º, 8º e 11º). Essa variação de altura entre os escritórios analisados pode auxiliar a verificar se a ventilação por efeito chaminé no vazio central está contribuindo para incremento das taxas de ventilação.

Com relação aos parâmetros de análise do conforto térmico dos usuários, foi adotada uma zona de conforto baseada na equação da regulamentação europeia EN 15251 (2007), que define neutralidade térmica (TN) como: $TN = 18.8 + 0.33T_{rm}$ (T_{rm} = média das temperaturas diárias)¹. Adicionalmente, a zona de conforto foi definida considerando uma variação térmica de + ou - 3 K, resultando em uma faixa de conforto de 6 K e em uma porcentagem de pessoas insatisfeitas de 10%.

¹ A grande diferença entre o modelo da EN e outros com o mesmo propósito, é que ele se baseia nas médias de temperaturas diárias e não somente na temperatura média mensal, considerando assim o efeito de condições climáticas recentes na aclimação do usuário.

Dessa forma, o algoritmo da EN 15251 foi aplicado aos dados climáticos de Guadalajara para todas as 8.760 horas anuais e assim se determinou qual a temperatura máxima aceitável. Com isso, foi possível plotar os resultados das simulações térmicas e identificar a quantidade anual de horas de superaquecimento em cada pavimento, conforme detalhado na Tabela 2. Além disso, também foi verificado o desempenho térmico do edifício com outros limites máximos de aceitação térmica (28°C e 29°C).

Tabela 2. Horas anuais de superaquecimento e taxas médias de ventilação.

	Escritório 4° Pavimento	Escritório 8° Pavimento	Escritório 11° Pavimento
Horas de Superaquecimento de acordo com faixa de conforto EN 15251. Temperatura máxima 30,7° C.	12	18	9
Horas de Superaquecimento acima de 29° C	147	139	135
Horas de Superaquecimento acima de 28° C (CIBSE)	323	317	272
Taxa de ventilação média (por hora) em uma semana típica de verão (trocas de ar por hora)	29,05	20,52	20,82

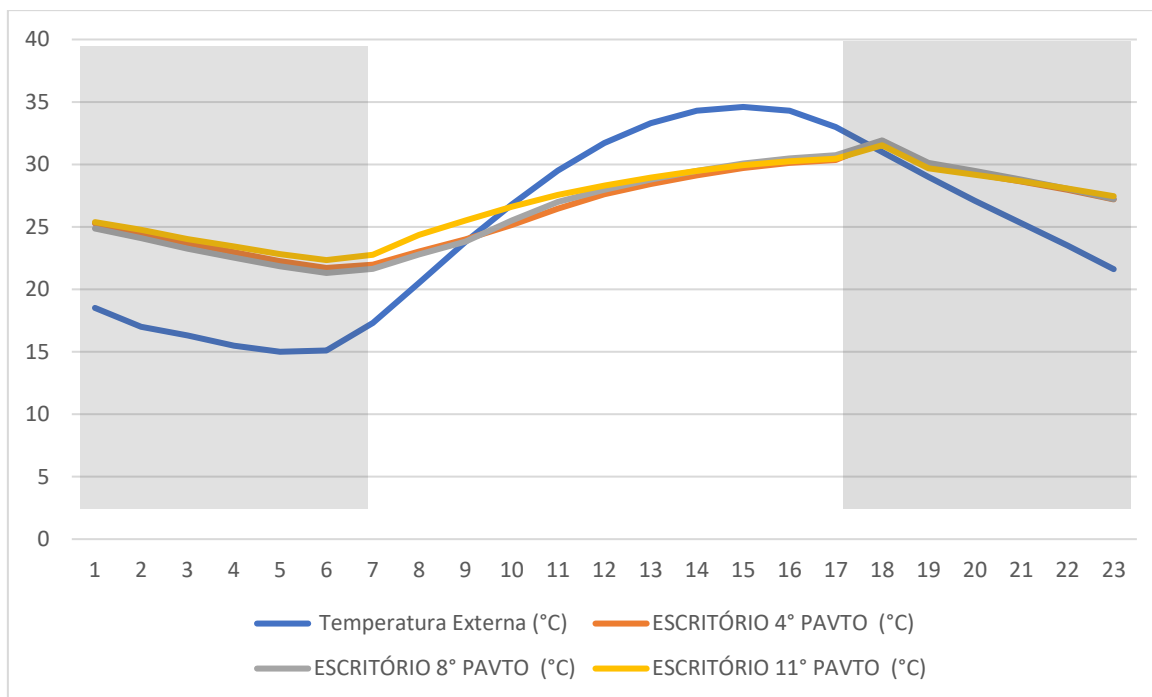


Figura 46. Simulação térmica para um dia com temperaturas altas de verão (11 de abril). Temperatura externa: bulbo seco. Caso-base e cenários: temperaturas resultantes.

3.5.3 Simulação térmica: análise dos resultados

Com base nos resultados apresentados na Tabela 2 e na Figura 46, é possível tecer as seguintes análises:

- O edifício conta com premissas de projeto que possibilitam a utilização de ventilação natural durante todo o ano (dentro de condições de conforto térmico), quando adotada como modelo de conforto a EN 15251 (2007).
- As taxas de ventilação são menores nos pavimentos superiores quando comparadas ao 4° pavimento, pois na planta do 4° pavimento há um terraço lateral que se abre para o oeste, na posição do vento predominante. Nos pavimentos 8° e 11° não há terraços laterais. Somente o vazio do átrio central.
- Em um dia de temperaturas altas de verão, as temperaturas resultantes dentro dos espaços de trabalho ficam aproximadamente 5°C mais baixas que as externas em razão do efeito da massa térmica exposta (laje de concreto) combinado com a ventilação noturna.

3.6 PESQUISA DE CAMPO

A pesquisa de campo foi realizada entre os dias 4 e 11 de março de 2019 e focou na realização de medições de temperatura e umidade no edifício em pavimentos distintos e nos terraços laterais para comparar se havia variação do desempenho térmico dos ambientes de trabalho e das áreas de transição, de acordo com a variação da altura e orientação solar. Por meio de entrevistas realizadas com os usuários, a pesquisa de campo também buscou entender com mais profundidade a real eficácia dos dispositivos de sombreamento e como os usuários interagem com a fachada (tanto os caixilhos como os brises) para adequar as condições de conforto térmico.

Em março de 2019, o edifício tinha quase todos os pavimentos ocupados, no entanto só foi possível conseguir acesso a três andares (5º, 12º e 13º) para instalação dos data loggers (Figura 47). Infelizmente os pavimentos 5º e 12º não utilizavam o layout *open plan*, o que impossibilitava a ventilação cruzada entre as fachadas externas e o vazio central. Posteriormente, por meio de entrevistas com funcionários da empresa administradora do edifício, verificou-se que a maior parte dos pavimentos não faz uso do layout *open plan*. Um dos motivos para isso é a dimensão reduzida de cada um dos blocos que compõem o pavimento tipo (com tamanho máximo de 175 m²), excluindo assim uma gama de locatários de empresas internacionais que normalmente buscam espaços maiores e mais amplos. Desse modo, o edifício passou a ter como perfil de locatário empresas locais, que, além de não ter uma cultura de escritórios com ocupação de layout mais contemporânea, ficam limitados pelo formato assimétrico da planta e pela metragem quadrada reduzida dos espaços, para conseguir uma proporção interessante entre salas fechadas e espaços abertos. No entanto, vale ressaltar que o formato assimétrico do edifício apresenta uma virtude interessante, possibilitando (por meio das suas múltiplas faces) que praticamente todas as regiões das plantas tenham janelas voltadas para a área externa, aumentando assim o potencial para ventilação natural (mesmo que unilateral).

3.6.1 Localização do data loggers

Além dos data loggers localizados nos espaços internos dos pavimentos 5º, 12º e 13º, outros dois data loggers foram posicionados nas áreas externas, possibilitando um comparativo entre as temperaturas das áreas externas e internas. Conforme pode ser visto nas figuras 47 e 48, um dos data loggers externos foi posicionado na varanda do quinto pavimento, que é voltada para o sul, mas que, em razão da sua profundidade, durante o dia fica parcialmente sombreada. O outro data logger para medição externa foi posicionado na varanda do 12º pavimento, que é descoberta (Figura 49).

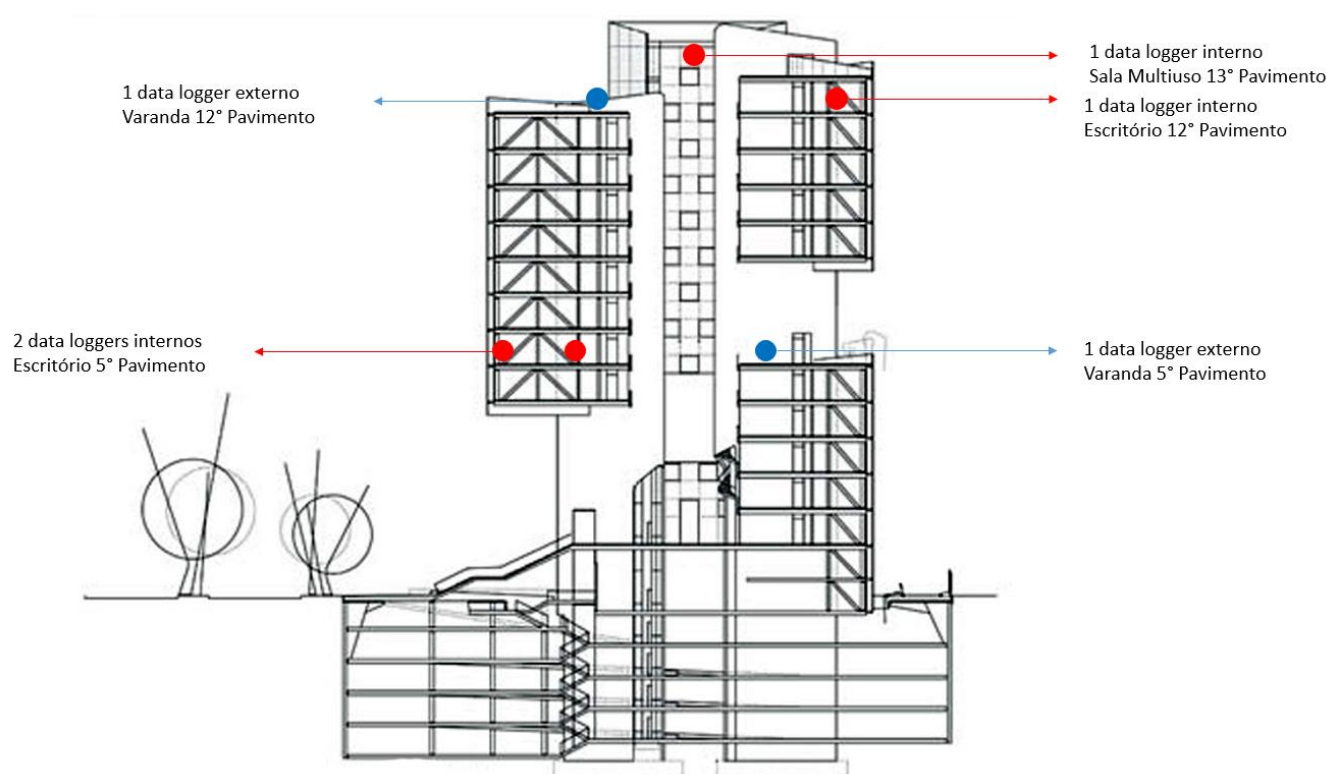


Figura 47. Corte esquemático demonstrando a posição dos data loggers.

Fonte: Autor desta tese.

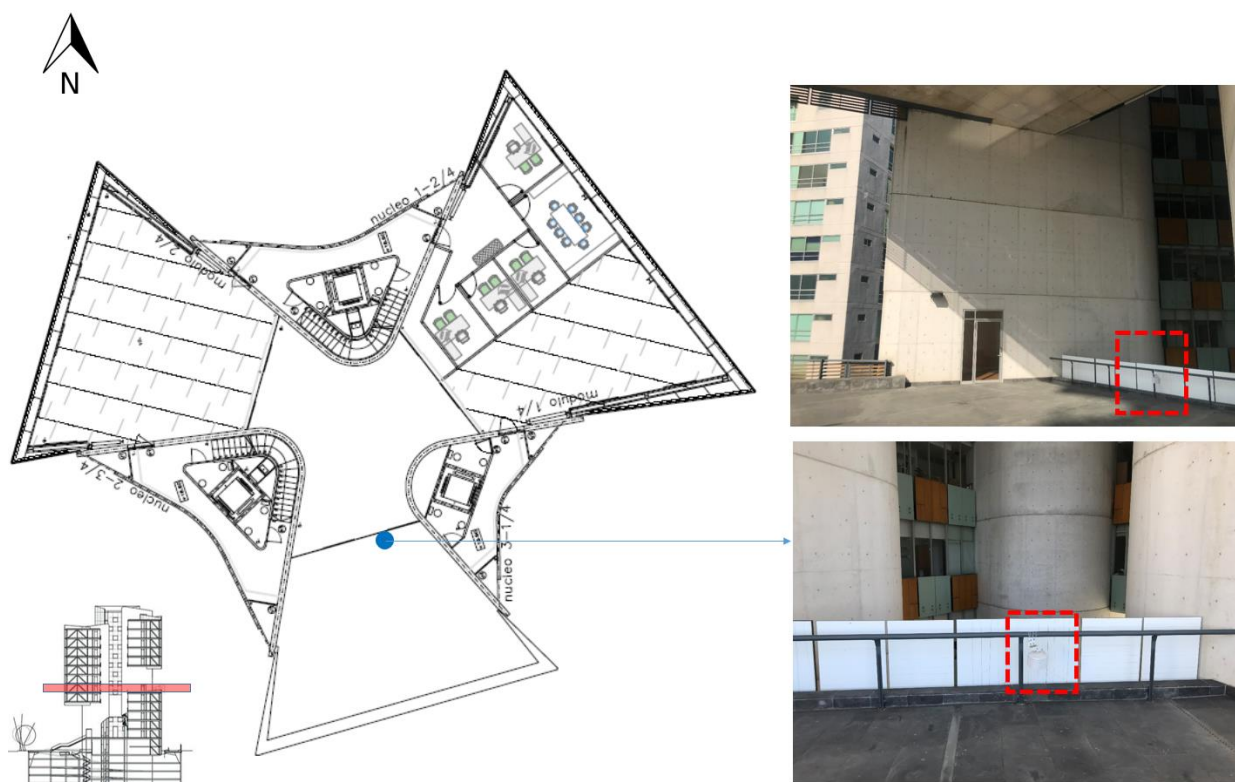


Figura 48. Planta baixa demonstrando a localização do data logger na varanda do 5º pavimento. A figura também apresenta duas fotos tiradas no local.

Fonte: Autor desta tese.

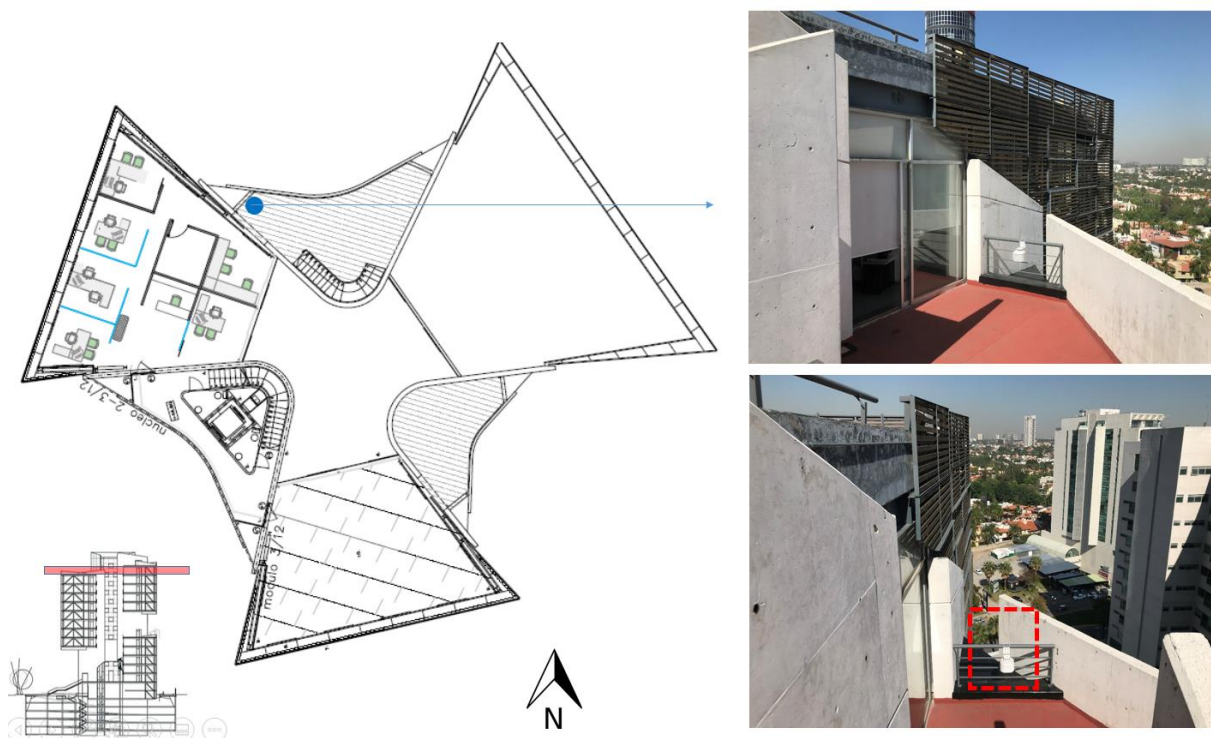


Figura 49. Planta baixa demonstrando a localização do data logger na varanda do 12º pavimento. A figura também apresenta duas fotos tiradas no local.

Fonte: Autor desta tese.

Em relação às áreas internas, conforme pode ser visto nas figuras 50 e 51, o escritório do quinto pavimento ocupa apenas metade de um dos blocos de 175 m² e sua planta é composta por cinco salas fechadas. Nesse escritório foram instalados dois data loggers, sendo uma localizado na recepção e o outro na sala de reunião voltado para a fachada nordeste. Durante a maior parte do dia a sala de reunião fica desocupada com a porta aberta, possibilitando uma ventilação cruzada entre a janela da recepção e a fachada nordeste. Outro aspecto importante a ser notado é que a recepção tem abertura para a fachada norte e não recebe insolação durante todo o ano (no Hemisfério Norte). Além disso, a mesa da recepcionista fica ao lado de uma das empenas estruturais de concreto do edifício, que também conta com a laje aparente (massa térmica), o que auxilia a regular a temperatura interna no verão, mas que, conforme relatado pela recepcionista, no inverno contribui para um ambiente com temperaturas bem frias e até desconfortáveis em alguns momentos.

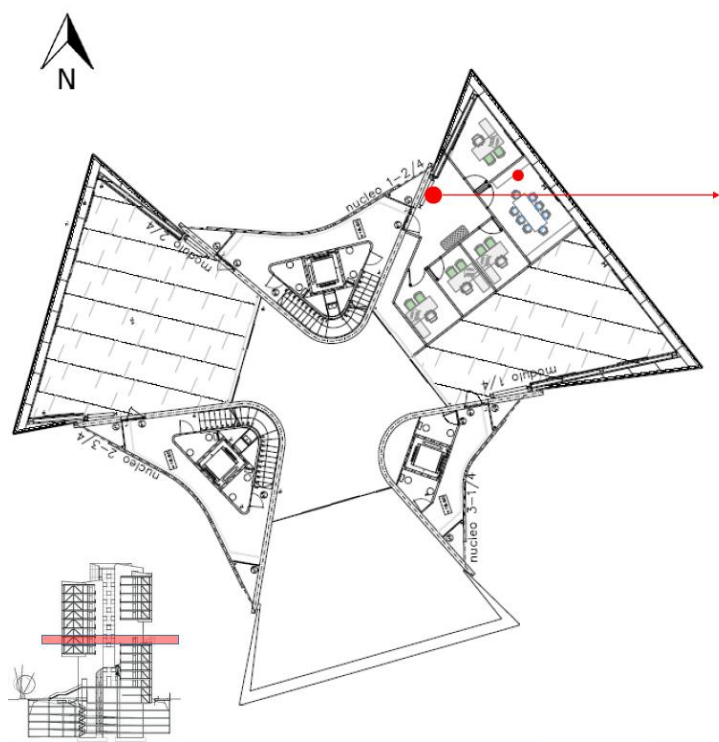


Figura 50. Planta baixa demonstrando a localização do data logger na recepção do escritório do 5º pavimento. A figura também apresenta duas fotos tiradas no local.

Fonte: Autor desta tese.

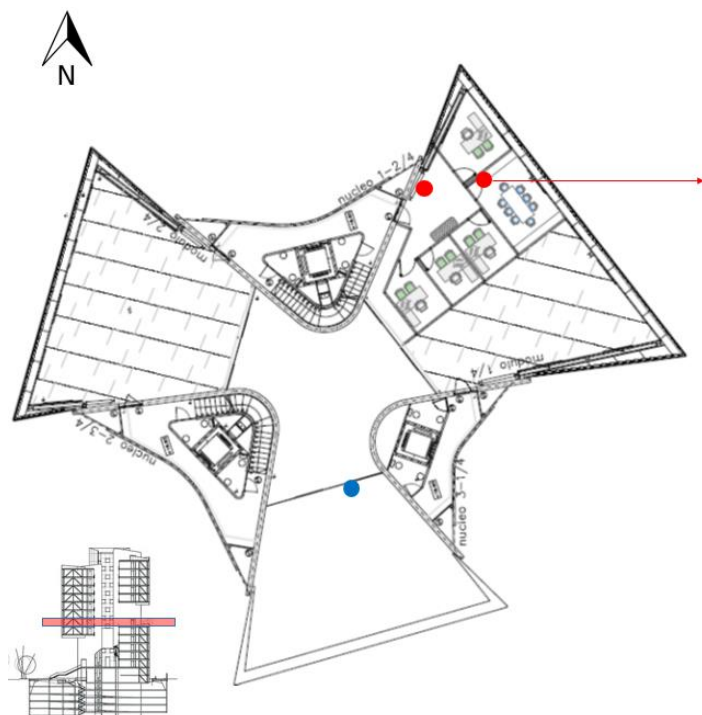


Figura 51. Planta baixa demonstrando a localização do data logger na sala de reunião do escritório do 5º pavimento. A figura também apresenta três fotos tiradas no local.

Fonte: Autor desta tese.

O 12º pavimento, ocupado pela sede da construtora e incorporadora que construiu o edifício (Grupo Cube), tem ocupação completa em um dos blocos do pavimento, com metragem de 135 m². Conforme pode ser visto na Figura 52, o layout interno também é segmentado por divisórias de vidro, no entanto, nesse caso, as salas não são fechadas pois não contemplam portas, possibilitando assim que o fluxo de ar permeie o ambiente. É interessante notar que os usuários sempre deixam a porta de entrada da recepção aberta, desse modo se nota uma ventilação cruzada entre as janelas das salas e da fachada oposta, com o hall de elevadores. Esse fluxo de ar é muito perceptível ao adentrar na empresa.



Figura 52. Planta baixa demonstrando a localização do data logger no escritório do 12º pavimento. A figura também apresenta duas fotos tiradas no local.

Fonte: Autor desta tese.

Já o 13º pavimento, que é o mais alto da torre, estava parcialmente desocupado, sendo utilizado como espaço multiuso e sala de almoço para os funcionários da incorporadora Grupo Cube. Como pode ser visto na Figura 53, o pavimento conta com laje exposta de concreto que, aliada à ventilação cruzada no ambiente, tem o potencial de proporcionar melhor condição de conforto. No entanto, esse bloco tem suas fachadas voltadas para orientações sul, leste e oeste, e que recebem a maior quantidade de radiação ao longo do ano, o que pode contribuir com o aumento da temperatura interna, caso os elementos de proteção solar não funcionem de forma eficiente.

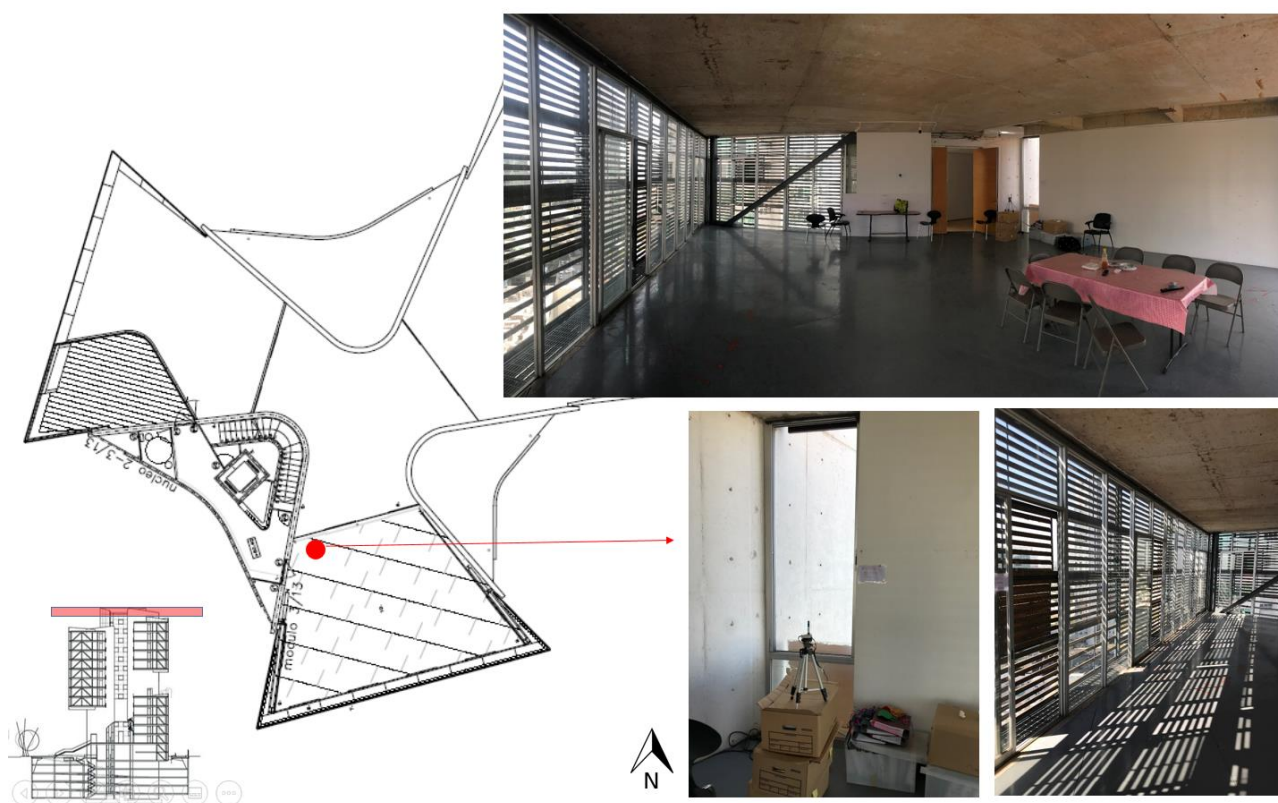


Figura 53. Planta baixa demonstrando a localização do data logger no espaço multiuso do 13º pavimento. A figura também apresenta três fotos tiradas no local.

Fonte: Autor desta tese.

3.6.2 Resultados das medições

O gráfico apresentado na Figura 54, demonstra a variação de temperatura e umidade na área externa do prédio (varandas do 5º e 12º pavimentos), durante o período de medição. Com base neste gráfico, pode-se tecer as seguintes conclusões:

- As temperaturas externas dessa semana estiveram acima da faixa de conforto (EN 15251), que está baseada nas temperaturas médias de 30 anos. Esta análise confirma os apontamentos feitos pelos usuários, de que na semana da medição as temperaturas estavam muito altas para o normal de março.
- A umidade relativa esteve baixa, o que é normal para aquela época do ano.

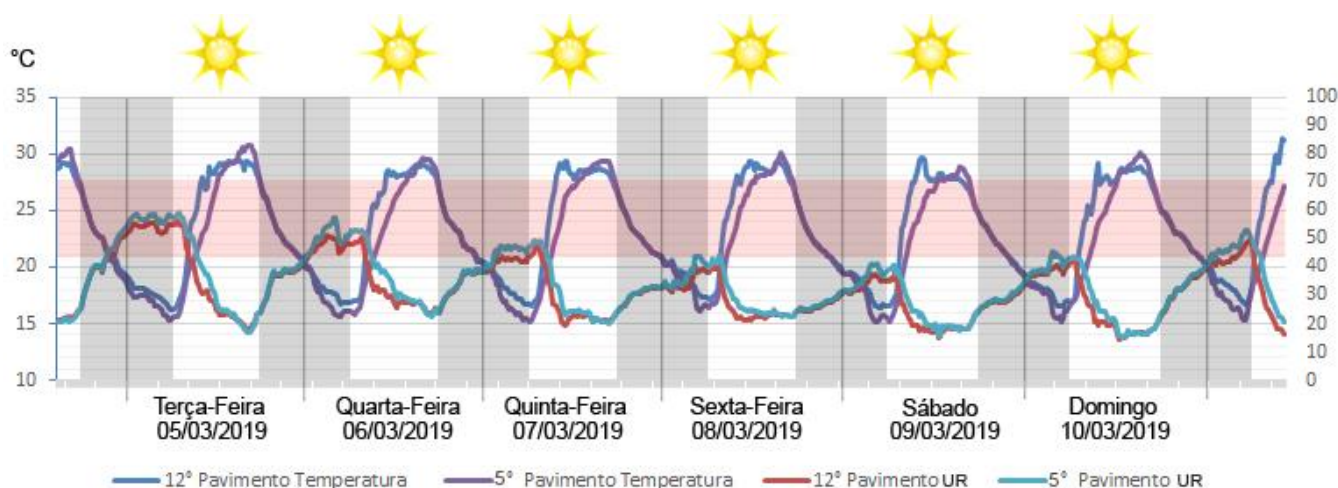


Figura 54. Gráfico com medições de temperatura e umidade relativa do ar, realizadas entre os dias 5/3/2019 e 10/3/2019. Neste gráfico foram retratadas apenas as medições externas, realizadas nos terraços do 5º e do 12º pavimentos.

Já o gráfico ilustrado na Figura 55 demonstra a variação de temperatura em todos os ambientes internos nos quais foram posicionados os data loggers, assim como nos externos.

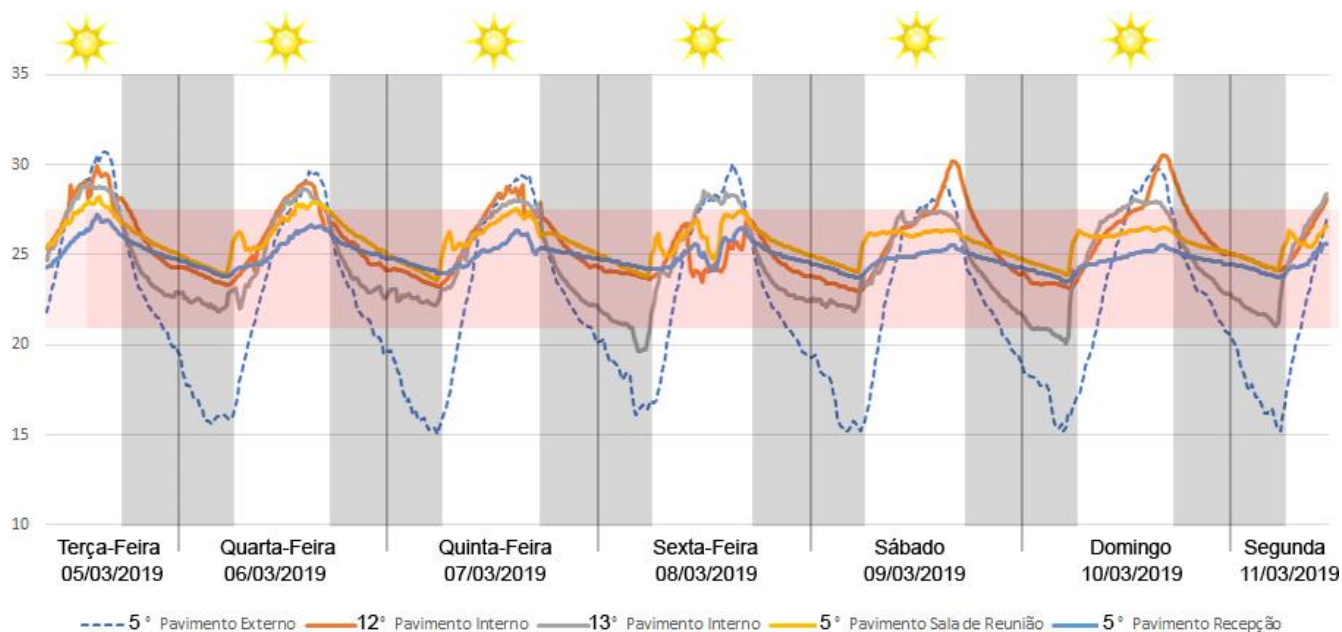


Figura 55. Gráfico com medições de temperatura do ar, realizadas entre os dias 5/3/2019 e 11/3/2019. Neste gráfico foram retratadas as medições realizadas nos escritórios do 5°, 12° e 13° pavimentos.

Com base nestes gráficos e nas informações fornecidas pelos usuários referentes à operação do edifício, pode-se tecer as seguintes conclusões:

- Nas medições durante o fim de semana, fica evidente que os dispositivos de proteção solar da fachada não proporcionam um controle solar efetivo, pois no 12° pavimento as temperaturas têm um pico após as 14 horas. Isso ocorre porque a principal fachada desse bloco de escritórios está voltada para noroeste, recebendo radiação solar direta no período da tarde. Adicionalmente, conforme relatado pelos usuários, nos fins de semana e durante a noite, as janelas dos escritórios (que são de correr) ficam fechadas, para evitar que as chuvas molhem a área interna, contribuindo ainda mais para a elevação da temperatura. Em contrapartida, nota-se que o mesmo pico de radiação é acompanhado por uma queda abrupta de temperatura em alguns dias da semana. Isso ocorre porque, durante os dias úteis, os usuários abrem as janelas no momento em que a radiação solar incidente é maior, e com o incremento da ventilação a temperatura diminui, ficando dentro da faixa de conforto.

- A recepção do 5º pavimento apresenta, durante o período diurno, as temperaturas mais baixas entre todas as medições, pois não tem exposição à radiação solar direta, além disso conta com massa térmica exposta no teto e na parede. Essas medições possibilitaram comprovar os resultados das simulações térmicas, pois, mesmo sem ventilação noturna, a recepção do 5º pavimento teve temperaturas até 5°C mais baixas que as temperaturas externas. É importante notar também que o escritório no qual foram posicionados os data loggers no 5º pavimento não conta com sistema de ar-condicionado instalado. Esse escritório opera em modo de ventilação natural durante o ano todo e os usuário relatam que, mesmo em dias de calor excessivo nas áreas externas, as temperaturas dentro do escritório são amenas. Isso reforça ainda mais a importância da orientação solar e de ter dispositivos eficazes de sombreamento.
- O 13º pavimento apresentou as temperaturas mais baixas durante a noite, pois foi o único ambiente interno em que as janelas foram mantidas abertas no período noturno (a pedido do autor desta tese). No entanto, durante o dia as temperaturas se mantiveram significativamente elevadas, demonstrando que a massa térmica exposta no teto e a ventilação cruzada não foram suficientes para compensar o efeito da radiação solar. Essa medição deu uma indicação de que, se o sombreamento fosse efetivo, as temperaturas diurnas poderiam ser ainda mais baixas que no 5º pavimento.

3.6.3 Relatos adicionais dos usuários

Os relatos dos usuários são de suma importância para a melhor compreensão a respeito do desempenho ambiental de um edifício. Além dos relatos já mencionados nas demais sessões deste capítulo, vale também ressaltar os seguintes aspectos mencionados:

- Os usuários relataram dificuldade em controlar o fluxo de ar com as janelas de correr e, por conta disso, mantêm as persianas rolô fechadas, como forma de controlar velocidades elevadas de ar nas estações de trabalho.

- Os usuários mencionaram ainda que no inverno o prédio é muito frio, principalmente nos pavimentos que não recebem tanta radiação solar direta. Uma das principais causas disso é o fato de que as principais fachadas do prédio são completamente envidraçadas com vidro laminado simples, fornecendo pouco isolamento térmico para as baixas temperaturas de inverno de Guadalajara. Um WWR (*window-to-wall-ratio*) reduzido poderia contribuir para manter as temperaturas internas mais elevadas nos dias mais frios.
- Durante a visita, também foi concedido acesso ao pavimento térreo, que abriga um escritório pequeno com quatro colaboradores (figuras 56 e 57). Não foi possível instalar um data logger nesse pavimento, no entanto os usuários desse escritório mencionaram que utilizam ventilação natural durante todo o ano e não sentem necessidade de utilizar ar-condicionado nem no verão. Vale lembrar que o escritório está voltado para uma face que não recebe radiação solar direta.



Figura 56. Foto do escritório do pavimento térreo.

Fonte: Autor desta tese.



Figura 57. Foto do escritório do pavimento térreo.

Fonte: Autor desta tese.

- Os usuários entrevistados relataram que as varandas do edifício são raramente utilizadas (Figura 58). Algumas pessoas não utilizam as varandas em razão da falta de mobiliário e também em decorrência de ventos excessivos. Os usuários do quinto pavimento utilizam mais a varanda para falar no celular, fumar e algumas vezes para comer um lanche. Além disso, outro aspecto verificado em campo é que a conformação física da planta tipo não facilita o acesso às varandas. Conforme mencionado anteriormente, cada pavimento tipo é composto por três blocos que são acessados por três núcleos de serviços independentes, que não se conectam entre si. Desse modo, em alguns casos, para acessar uma das varandas que estão em um pavimento distinto, é necessário o usuário descer até o térreo e pegar o elevador de um outro núcleo que dê acesso à varanda.



Figura 58. Foto da varanda do 2º pavimento, demonstrando um espaço sem mobiliário e sem ocupação.
Fonte: Autor desta tese.

3.6.4 Considerações finais da pesquisa de campo

Nesta pesquisa, não foi possível tecer uma comparação a respeito do desempenho térmico entre os pavimentos, pois os data loggers foram posicionados em escritórios voltados para diferentes orientações, que estão submetidos a intensidades diferentes de radiação solar e de vento. No entanto, em linhas gerais, pode-se afirmar que o edifício Torre Cube é um exemplo bem-sucedido de aplicação de ventilação natural em uma cidade de clima quente. Em geral os usuários entrevistados no edifício relataram um grau elevado de satisfação com o ambiente térmico e, conforme verificado nas medições, mesmo em dias com temperaturas externas próximas de

30°C, a ventilação natural demonstrou ser eficiente. Com base nesta pesquisa, foi possível reunir algumas lições apreendidas que podem contribuir com melhorias na aplicação de estratégias passivas de projeto para edifícios de escritório:

- Em geral, os pavimentos estudados, que não recebem radiação solar direta ao longo do ano (em razão da orientação), evidenciaram não haver sistema de ar-condicionado instalado, utilizando a ventilação natural como único modo de arrefecimento das temperaturas externas. Em contrapartida, os pavimentos localizados nas fachadas que recebem maior insolação operam em modo misto, utilizando o ar-condicionado nos dias mais quentes. Isso demonstra também que o bloqueio da radiação solar de forma efetiva é de grande importância para a eficácia da estratégia de ventilação natural.
- O sistema de janelas de um edifício de escritórios deve fornecer um elevado controle do fluxo de ar por parte dos usuários, a fim de evitar velocidades excessivas nas estações de trabalho, podendo se adaptar também nos casos em que as velocidades de vento forem mais amenas. Outro aspecto importante, referente ao projeto de janelas, é que elas devem possibilitar proteção contra a chuva, permitindo que os usuários as deixem abertas durante a noite, o que possibilita ventilação noturna.
- Verificou-se também na pesquisa que os brise-soleils da fachada bloqueiam boa parte da iluminação natural. Por este motivo os escritórios utilizam iluminação artificial durante o ano todo. Desse modo, saliente-se que um sistema de proteção solar que leva em consideração o acesso à luz natural pode contribuir para reduzir os ganhos de calor provenientes de ocupação e, portanto, melhorar a eficácia do sistema de ventilação natural.
- As varandas e os espaços de transição em um edifício de escritórios, para que exerçam a função de extensão do ambiente de trabalho, devem ser de fácil acesso aos usuários. Adicionalmente, esses espaços devem contar com mobiliário adequado que possibilite realizar reuniões informais e outras atividades pertinentes. Os espaços de transição devem também proporcionar elevado conforto térmico aos usuários, por meio do controle das velocidades excessivas de vento. Esse controle pode ser realizado utilizando divisórias de vidro semiabertas, dispostas nas áreas de permanência mais prolongada.

Capítulo 4

CAPÍTULO 4. CONTEXTO CLIMÁTICO: o clima da cidade de São Paulo e o impacto do sombreamento de fachadas

Este capítulo contempla inicialmente uma análise do clima de São Paulo, enfatizando a importância da ventilação natural e do sombreamento de fachadas para alcançar conforto térmico por meios passivos.

De forma complementar, uma pesquisa de campo, em um edifício ventilado naturalmente em Jundiaí-SP, demonstra na prática quais as principais questões referentes a operação e comportamento dos usuários em edifícios sem ar-condicionado.

Por fim, foram apresentados estudos analíticos que quantificaram o impacto dos dispositivos de sombreamento na redução da radiação solar direta e difusa incidente em cada uma das orientações (leste, oeste, norte e sul).

4.1 CONTEXTO CLIMÁTICO

São Paulo está localizada na Região Sudeste do Brasil, na latitude 23°3' sul e longitude 46°4' oeste de Greenwich. Está posicionada a aproximadamente 85 km da costa e a 800 m acima do nível do mar. A população de São Paulo é de mais de 12 milhões de habitantes, distribuídos em uma área de 1,521 km² (IBGE, 2021). De acordo com Köppen-Geiger (apud ALVARES et al., 2013), o clima de São Paulo é classificado como subtropical úmido. Como pode ser visto na Figura 59, as temperaturas podem chegar até 33°C no verão e 8°C no inverno. Entretanto, para a maior parte do ano, permanecem entre 15°C e 25°C. A alta amplitude térmica diária, que é em torno de 10°K, indica o potencial para a aplicação de soluções de resfriamento passivo por intermédio da inércia térmica.

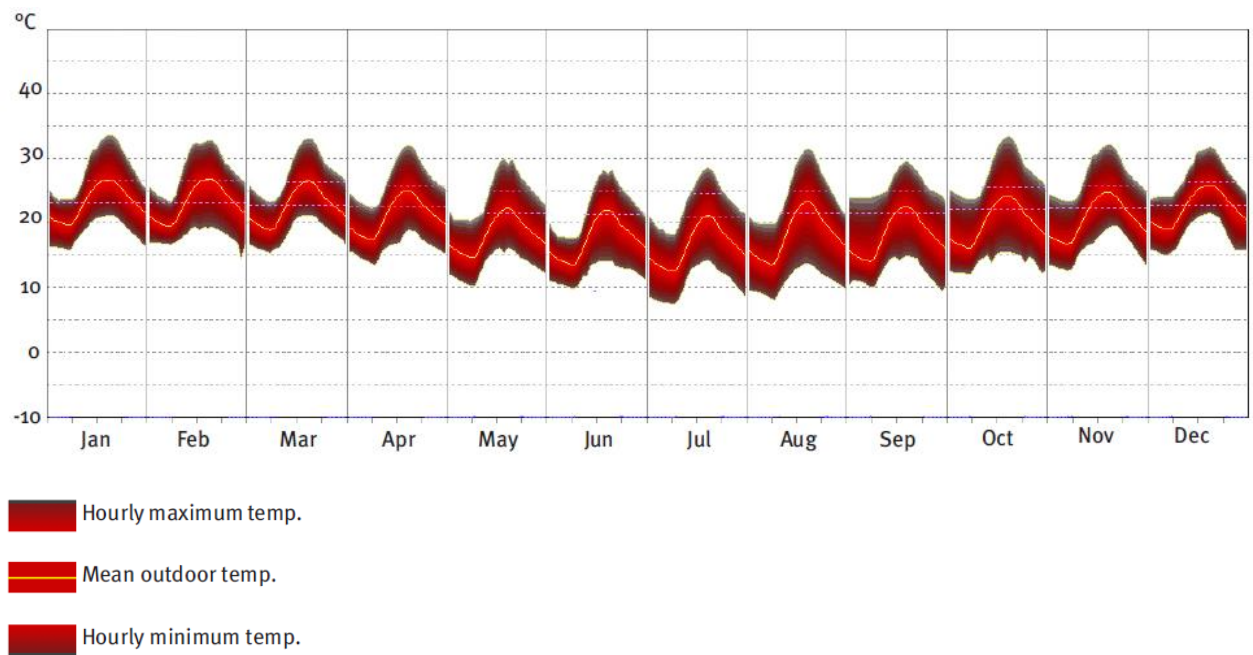


Figura 59. Temperaturas médias diárias em todos os meses do ano.

Fonte: Adaptado de Meteonorm 6.1 (METEOTEST, 2009).

Lamberts (2011) analisou a carta psicométrica de São Paulo e observou que a temperatura do ar permanece durante 27,1% das horas anuais dentro da zona de conforto. No entanto, das 72,9% remanescentes (em condições de desconforto), 59,4% são em razão das baixas temperaturas e apenas 13,5% decorrentes das altas temperaturas. Esta afirmação confirma que, de forma geral, as temperaturas de verão não são o maior desafio a ser superado no processo de projeto, se os ganhos de calor indesejados são bloqueados por meio do uso eficiente do controle solar.

Outro aspecto importante que possui um grande impacto nas condições de conforto em geral são as altas taxas de umidade. Como pode ser visto na Figura 60, uma média de 80% de umidade relativa é encontrada ao longo do ano. Sabe-se que a alta umidade restringe a evaporação, ampliando a sensação de umidade na pele, o que pode levar ao desconforto. Neste caso, a ventilação e o movimento de ar desempenham um papel importante em elevar as condições de conforto, dado que elas permitem o resfriamento convectivo da pele.

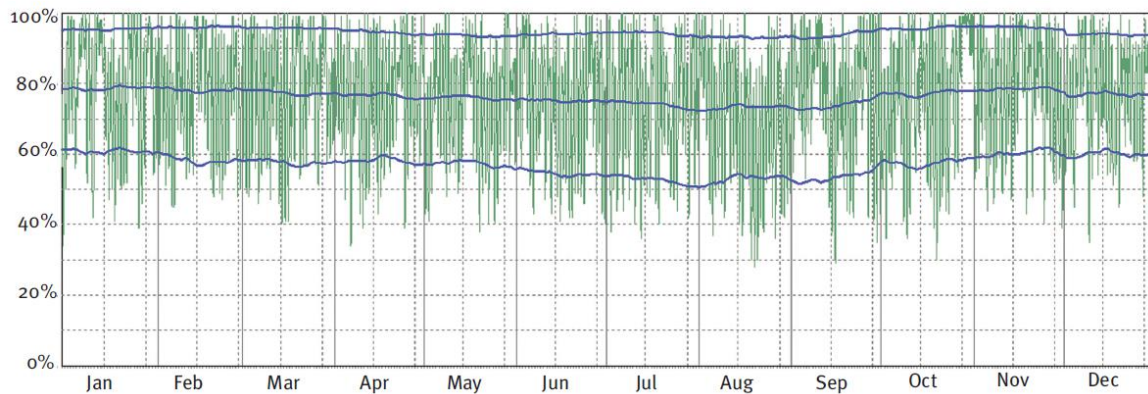


Figura 60. Umidade relativa ao longo do ano.

Fonte: Adaptado de Meteonorm 6.1 (METEOTEST, 2009).

De acordo com Lamberts et al. (2011), o movimento do ar é um grande determinante quanto a se temperaturas de operação mais altas para o verão são aceitáveis ou não pelos usuários. Além disso, eles também mencionam que usuários de edifícios ventilados naturalmente no Brasil aceitam variações de temperatura ao longo do dia e do ano, e geralmente preferem maiores velocidades de ar, caso haja possibilidade de controle em relação ao fluxo e à intensidade do vento. A Figura 61 especifica os limites de aceitação do movimento do ar para uma gama de temperaturas de operação. Este gráfico foi elaborado com base em experimentos de campo, realizados em edifícios não residenciais em diferentes zonas climáticas do Brasil, nos quais 5.000 questionários foram aplicados, tanto no verão quanto no inverno. É possível notar que mais de 80% da aceitabilidade térmica dos usuários pode ser encontrada dentro de uma variação de velocidades de ar entre 0,2 e 0,9 m/s, em uma faixa de temperaturas entre 18°C e 32°C. Além disso, vale ressaltar que, mesmo que velocidades do ar entre 0,8 e 0,9 m/s sejam reportadas como aceitáveis pelos usuários desse estudo, isso não significa que velocidades de ar mais elevadas (acima de 1,0 m/s) serão percebidas como desconfortáveis. Arens et al. (2006) afirmam que, embora altas velocidades de vento possam ser uma preocupação relevante em climas frios, a possibilidade de elas proporcionarem desconforto térmico em ambientes quentes é significativamente menor. Ademais, o Standard 55 da ASHRAE (ASHRAE, 2010) define que o limite de aceitação para o movimento de ar interno é 1,2 m/s, quando é oferecido o controle aos usuários.

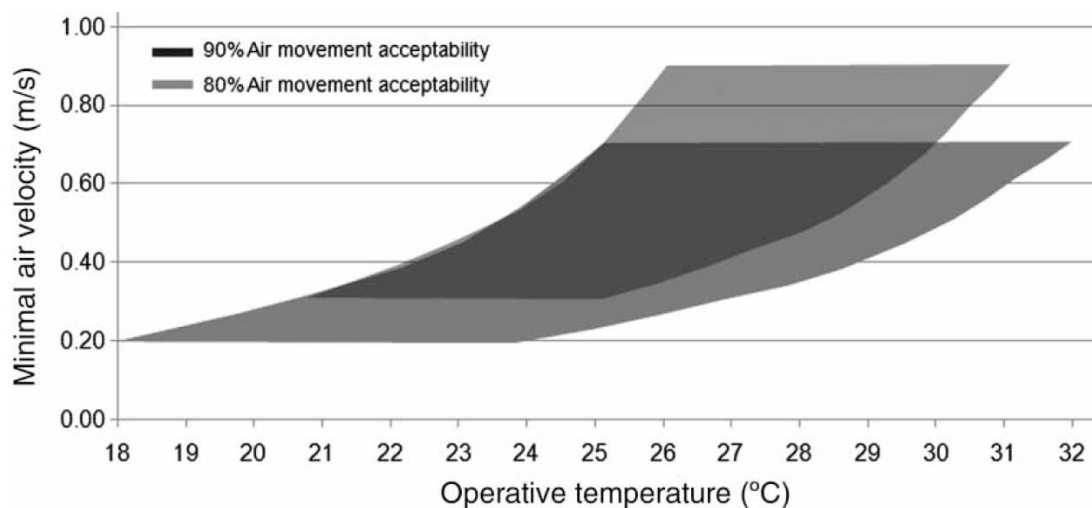


Figura 61. Aceitabilidade em relação ao movimento de ar, em resposta a diferentes temperaturas operativas.

Fonte: Lamberts et al. (2011).

Os ventos predominantes de São Paulo são provenientes das direções leste e sudeste, como pode ser visto na Figura 62. A velocidade de vento média varia entre 2 m/s e 4 m/s para a maior parte do ano. Velocidades mais altas entre 7 m/s e 10 m/s podem ser encontradas, embora isso ocorra somente durante algumas horas do ano.

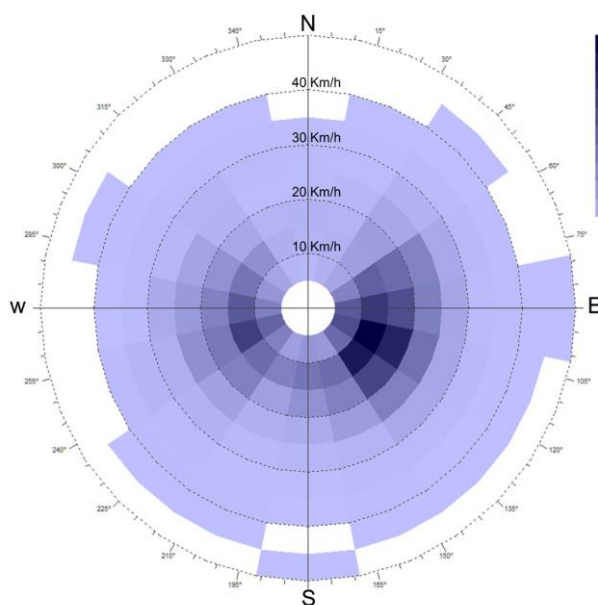


Figura 62. Rosa dos ventos para São Paulo.

Fonte: Adaptado de Meteoronorm 6.1 (METEOTEST, 2009).

A condição de céu com maior frequência de ocorrência encontrada em São Paulo é a nublada (7-8 octas), representando 60% do ano; ao passo que as condições

de céu limpo (0-3 octas) e parcialmente nublado (4-6 octas) têm ocorrências de 21% e 19%, respectivamente.

4.2 PESQUISA DE CAMPO: Prefeitura de Jundiaí-SP

Esta seção do capítulo faz parte dos estudos realizados por Cotta (2012), que fornecem informações relevantes a respeito da operação de um edifício de escritórios ventilado naturalmente durante todo o ano, localizado em cidade próxima de São Paulo. Esse edifício conta com um átrio central, contribuindo para as estratégias de ventilação natural.

A pesquisa de campo foi realizada na Prefeitura de Jundiaí, cidade de 370 mil habitantes, localizada a aproximadamente 50 km de São Paulo. O edifício foi projetado pelo arquiteto Araken Martinho, que ganhou o primeiro lugar em um concurso nacional realizado em 1987. O projeto do edifício responde a questões relacionadas à ventilação e iluminação naturais em ambientes de trabalho e espaços de transição.

A preocupação em proporcionar maior conforto térmico aos usuários por meios passivos levou o arquiteto a consultar um especialista em conforto ambiental, o que não era comum na época. O resultado desse processo minucioso de projeto pode ser notado na qualidade ambiental do edifício, possibilitando que, desde sua inauguração, ele opere sem sistemas ativos de climatização. Vale ressaltar que o edifício está inserido em um contexto climático muito semelhante ao de São Paulo, onde quase 100% dos novos edifícios de escritório são dependentes de ar-condicionado.



Figura 63. Vista externa da fachada norte.
Fonte: Cotta (2012).

4.2.1 O edifício

O edifício sede da Prefeitura de Jundiaí tem nove pavimentos e fica localizado fora do centro da cidade, em uma região de topografia mais elevada (Figura 63). O terreno do edifício é circundado por um parque, resultando em um ambiente urbano calmo e silencioso. As fachadas principais são orientadas para norte e sul e o corpo do edifício é dividido em dois blocos que são conectados por um átrio central. O átrio proporciona vistas internas entre os diferentes pavimentos e auxilia a impulsionar a ventilação natural, além de permitir a penetração de luz natural no interior da planta (Figura 64). O térreo, onde está localizada a entrada principal do edifício, também abriga uma praça coberta que funciona como um espaço de transição. O edifício foi inteiramente construído em concreto aparente e na envoltória do edifício foram aplicados vidros laminados refletivos (nas áreas de trabalho) e transparentes (na cobertura do átrio). O layout interno dos ambientes de trabalho é predominantemente

de planta livre (*open plan*), com algumas salas de reunião e escritórios fechados distribuídos ao longo dos andares.



Figura 64. Vista interna do átrio central.

Fonte: Cotta (2012).

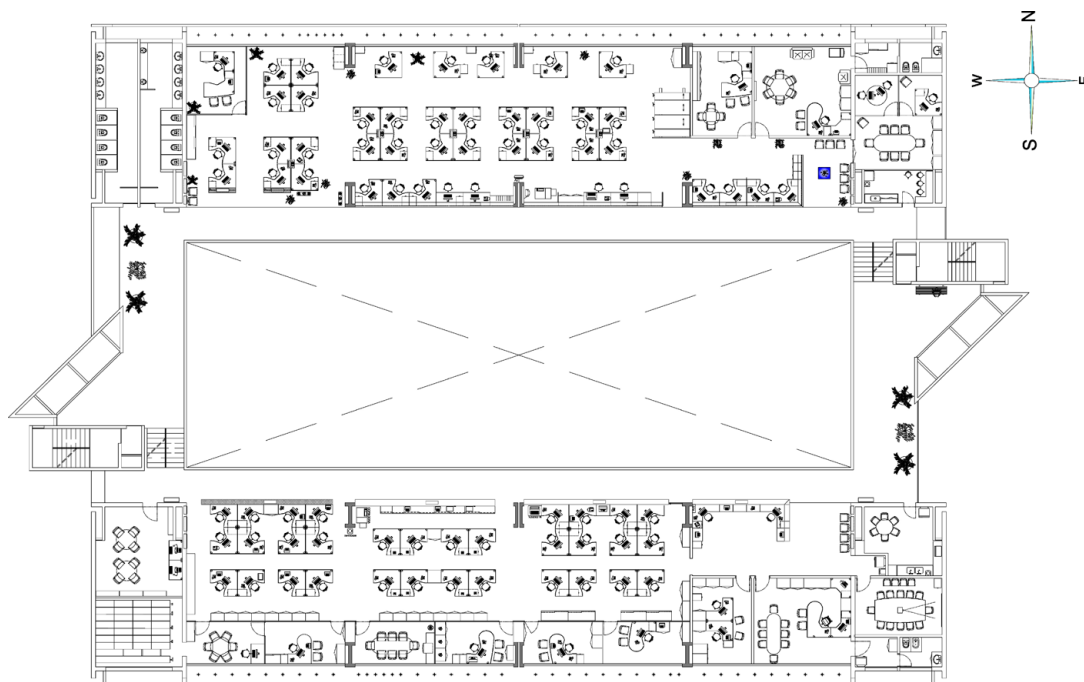


Figura 65. Planta do pavimento tipo.

Fonte: Cotta (2012).

4.2.2 Visita ao edifício

A visita ao edifício foi realizada em 11 de abril de 2012, entre 12h e 17h. Durante esse período, as temperaturas externas variaram entre 27°C e 30°C, o que pode ser considerado significativamente alto para a estação (primavera), permitindo uma boa oportunidade para entender como o edifício desempenha em dias de verão e como os ocupantes respondem a essas condições. A visita focou em dois andares, um voltado para o norte e o outro voltado para o sul. Como parte da pesquisa, medições pontuais de velocidade do ar e iluminação foram realizadas, além da aplicação de questionários com os usuários. Os questionários foram aplicados em 30 usuários, o que representa mais de 50% do quadro de funcionários de cada pavimento investigado. Além disso, com a intenção de obter dados precisos em relação à performance do edifício durante o período de uma semana, quatro data loggers foram instalados em diferentes posições (em uma varanda externa, no espaço de transição do térreo, no escritório da fachada norte e no escritório da fachada sul), conforme demonstrado na Figura 66. Dessa forma, foi possível entender também como o edifício se comporta sem o efeito dos ganhos de calor internos, quando não está ocupado durante os fins de semana.

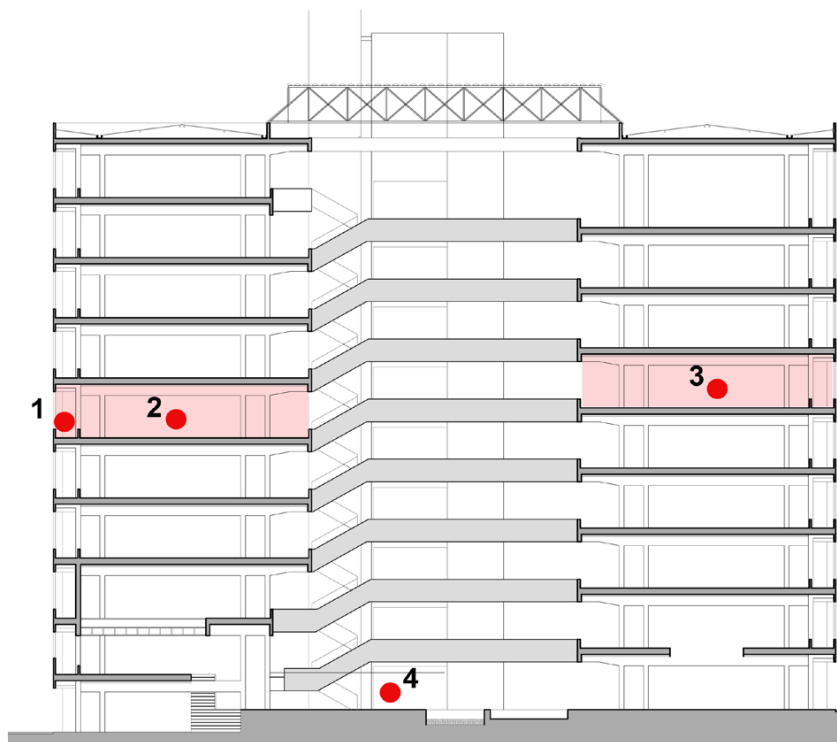


Figura 66. Corte demonstrando onde foram instalados os data loggers.
Fonte: Cotta (2012).

4.2.3 Luz natural

As medições pontuais foram realizadas no escritório de planta livre voltado para a fachada sul, com o intuito de avaliar os níveis de iluminação natural nos ambientes de trabalho. Durante o período das medições a condição predominante de cobertura de nuvens no céu era de 1 octa. É importante ressaltar que a iluminação artificial foi desligada momentos antes do início das medições (às 14h). Como pode ser visto na Figura 67, esse ambiente de trabalho possui poucas condições de iluminação natural, com níveis aceitáveis nas estações de trabalho próximas das janelas, no entanto uma queda abrupta foi identificada a poucos metros do perímetro, chegando a 0 lux no meio do ambiente. O corredor faceando o átrio apresentou os maiores valores de iluminação natural, no entanto as estações de trabalho próximas não se beneficiam, visto que existe uma divisória alta separando a área de trabalho da circulação pública.

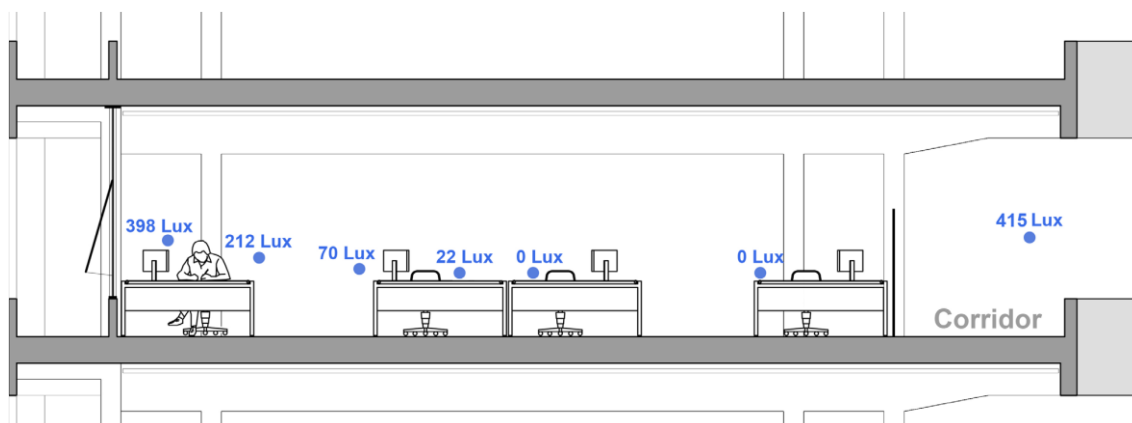


Figura 67. Corte demonstrando as medições de luz natural.

Fonte: Cotta (2012).

Sabe-se que o vidro refletivo possui uma baixa transmitância luminosa. Esta pode ser uma explicação possível para a baixa qualidade de luz natural mesmo para plantas não profundas (12 m) e sem obstruções externas. Com a intenção de verificar esta hipótese, simulações de iluminação natural utilizando o software Radiance (RADIANCE, 2012) foram produzidas para o mesmo pavimento onde as medições pontuais foram realizadas, utilizando as mesmas condições de céu identificadas na pesquisa de campo. A Figura 68 representa a simulação do caso-base, em que foi utilizado o mesmo tipo de vidro que foi aplicado no edifício existente. É possível observar que o vidro refletivo de fato reduz os níveis de iluminação natural nas áreas de trabalho, inclusive próximo das janelas. Os níveis de iluminância alcançados nesse caso são similares aos medidos em campo, o que pode ser considerado uma calibragem do modelo. Em seguida, outra simulação foi realizada modificando o tipo de vidro das janelas para transparente, o que atribui maior transmitância luminosa. Como pode ser visto nas figuras 69 e 70, nesse caso as condições de iluminação natural são muito mais adequadas para o ambiente de trabalho, considerando que os menores níveis encontrados no ambiente são de 400 lux, o que é acima do nível mínimo (200 lux) recomendado pelo CIBSE Guide A (CIBSE, 2019)². Neste caso, pode-se concluir que a alteração do tipo de vidro para transparente teria um impacto

² Vale ressaltar que norma brasileira ABNT NBR ISO/CIE 8995-1:2013 recomenda uma iluminação média de 500 Lux para ambientes de escritório, no entanto, além do CIBSE outros autores (e.g. BAKER E STEEMERS, 2002) também entendem que um nível mínimo de 200 Lux é aceitável para ambientes de escritório que utilizam computadores.

positivo nas condições de iluminação do ambiente. Desse modo, a quantidade de horas utilizando a iluminação artificial poderia ser reduzida consideravelmente, o que consequentemente reduziria os ganhos de calor internos.

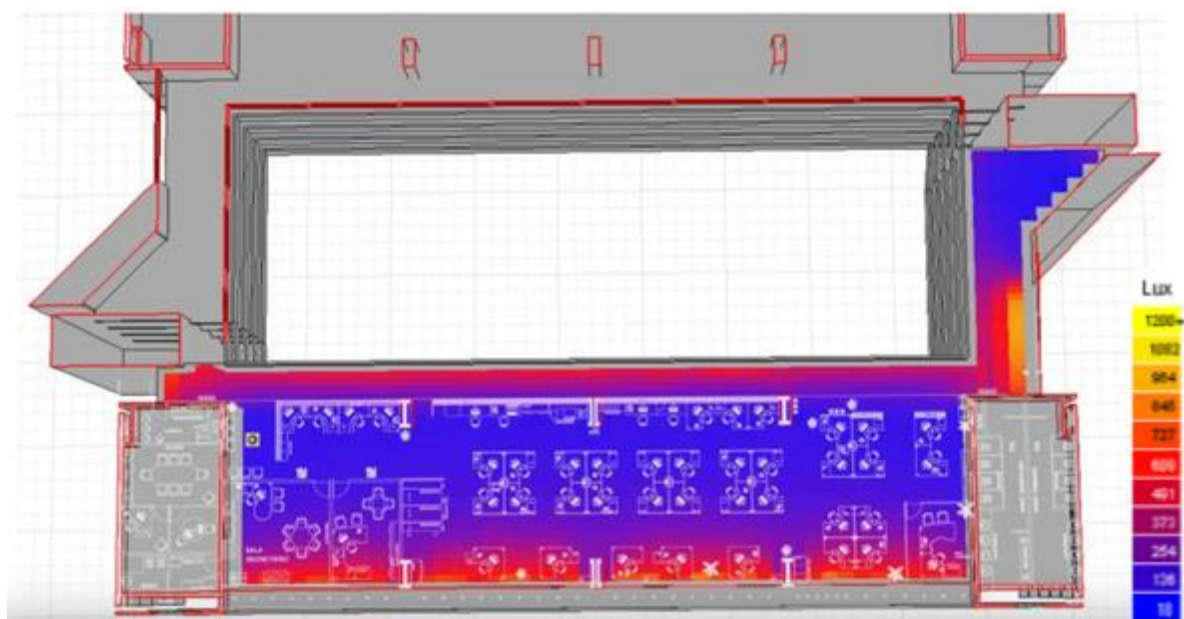


Figura 68. Simulação de iluminação natural para o quarto pavimento, considerando o cenário existente, no qual é utilizado o vidro refletivo. Simulação às 15h no mês de abril. Condições de céu encoberto.

Fonte: Cotta (2012).

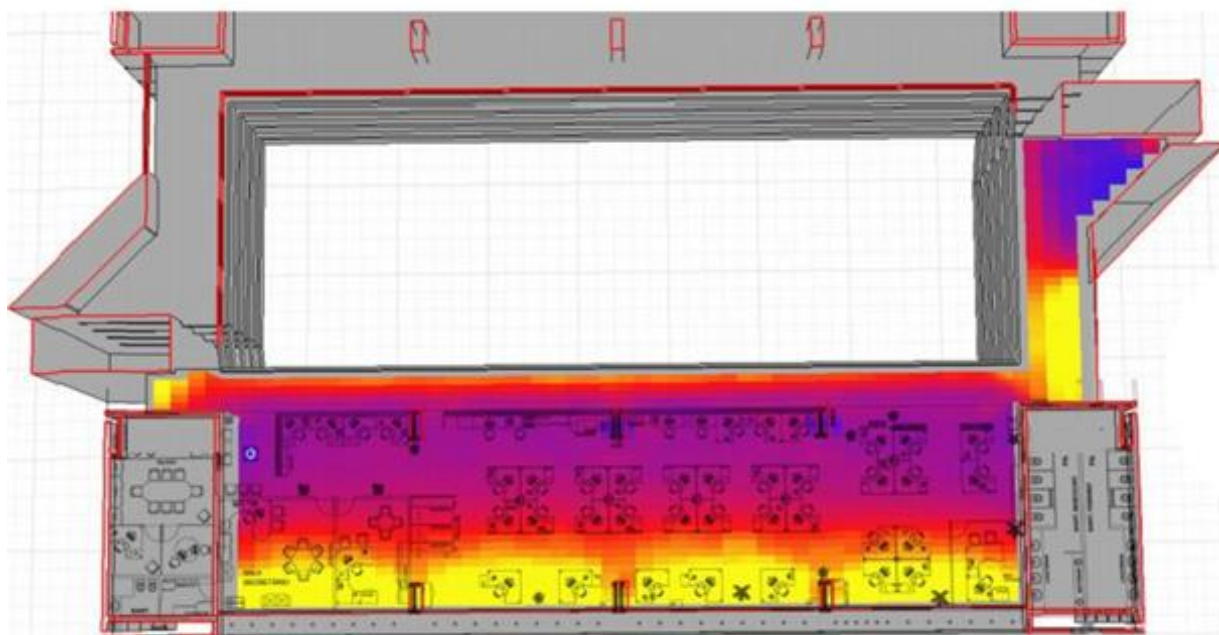


Figura 69. Simulação de iluminação natural para o quarto pavimento, considerando um cenário com vidro incolor. Simulação às 15h no mês de abril. Condições de céu encoberto.

Fonte: Cotta (2012).

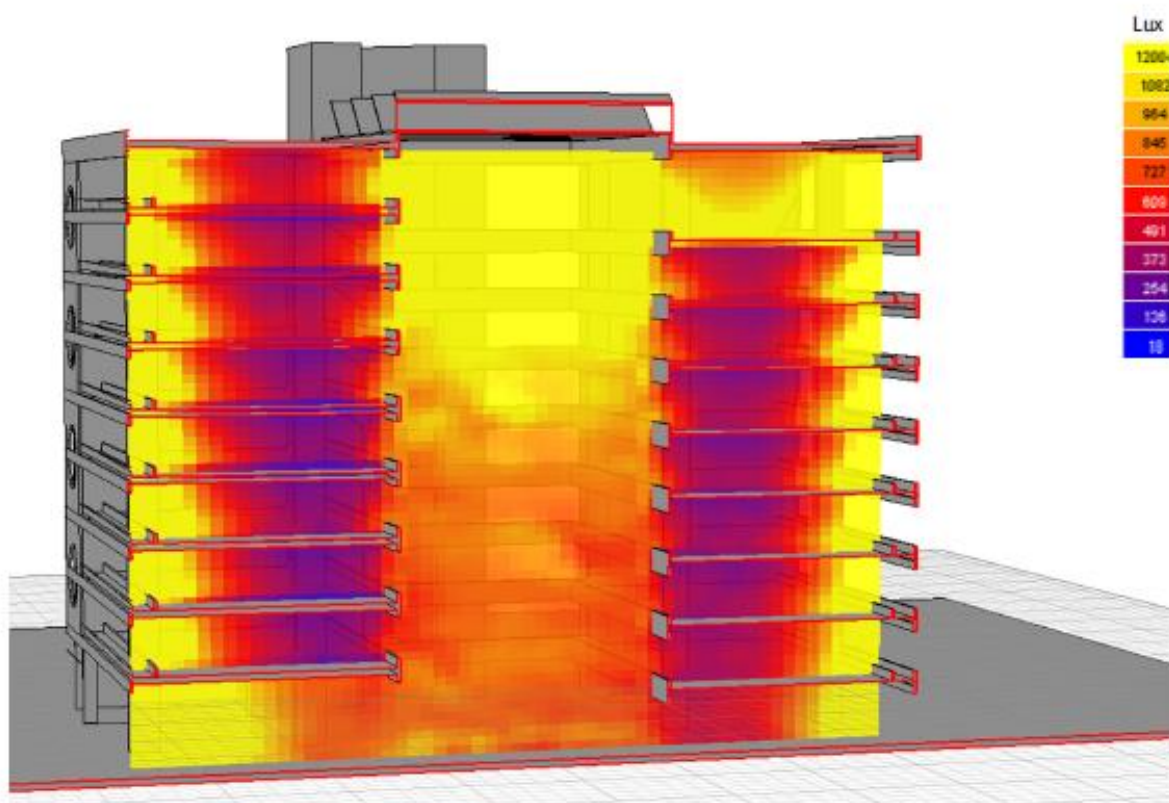


Figura 70. Corte. Simulação de iluminação natural, considerando um cenário com vidro incolor. Simulação às 15h no mês de abril. Condições de céu encoberto.

Fonte: Cotta (2012).

Com relação à estratégia de controle solar, durante a maior parte do ano, o edifício possui uma boa proteção da radiação direta. Os beirais de concreto na fachada bloqueiam o sol na orientação norte durante a estação mais quente; no entanto, durante a primavera e o inverno, quando o sol é mais baixo no céu, a luz solar entra no ambiente e cria um desconforto visual aos ocupantes sentados próximos das janelas. Esse desconforto também é percebido no nível fisiológico, quando a radiação solar direta atinge os usuários. O edifício possui cortinas internas que atualmente não estão em funcionamento em razão da falta de manutenção, assim os usuários não possuem opção de controle manual da incidência solar. Já a fachada voltada para a orientação sul recebe pouca radiação direta ao longo do ano, no entanto nota-se que no verão os ambientes de trabalho ficam expostos ao sol durante as primeiras horas da manhã. Para essa orientação, seriam necessários dispositivos verticais de sombreamento para um controle solar mais eficiente (em vez dos beirais que foram utilizados).

4.2.4 Conforto térmico

O concreto aparente nesse edifício, combinado com a utilização de forro do tipo colmeia, permite que a massa térmica seja vinculada aos ambientes de trabalho, proporcionando um efeito positivo na redução das flutuações de temperatura diurnas, absorvendo os ganhos internos durante o dia e liberando-os durante a noite. A Figura 71 demonstra as temperaturas registradas pelos data loggers entre 11 e 19 de abril. É possível observar que a diferença entre a média das temperaturas internas para o dia e para a noite é usualmente menor que 4°K, ao passo que externamente é próximo de 8°K. Estes dados demonstram que a utilização da inércia térmica como estratégia de resfriamento passivo seria mais efetiva se fosse aplicada à ventilação noturna. No entanto, em decorrência de questões de chuva e segurança, as janelas são fechadas ao fim da jornada de trabalho. Adicionalmente, a Figura 71 também demonstra que, em razão dos ganhos de calor provenientes de ocupação, as temperaturas nos ambientes de trabalho são geralmente iguais ou ligeiramente acima das temperaturas externas máximas.

As entrevistas e os questionários possibilitaram uma boa indicação no que diz respeito à satisfação dos usuários do edifício ao longo do ano. Durante os dias quentes de verão, eles indicaram estar bastante insatisfeitos com as condições térmicas do edifício. No entanto, durante o período em que os questionários foram aplicados, a maioria dos ocupantes reportou se sentir ligeiramente aquecida, mas ainda confortável, apesar de que as temperaturas internas variaram entre 29°C e 30°C. Portanto, é possível concluir que, durante os dias quentes de verão, as temperaturas internas poderiam facilmente exceder estes valores. Em contrapartida, durante as demais estações do ano, a maioria dos ocupantes entrevistados afirmou que se sente confortável, com exceção dos dias mais frios, quanto há uma alta infiltração pelos caixilhos antigos, permitindo uma corrente de ar indesejável.

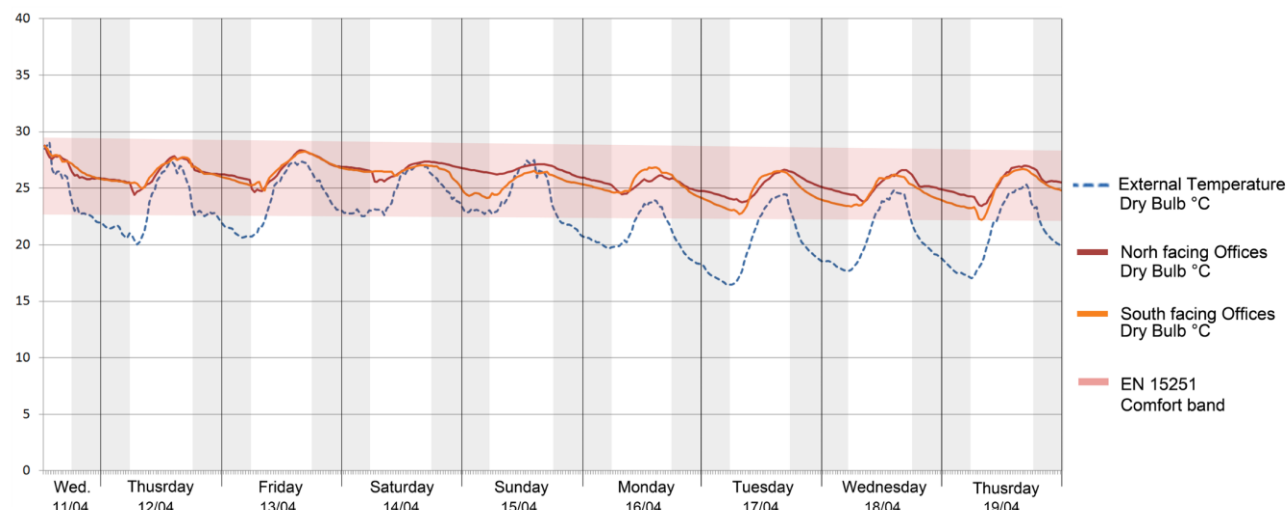


Figura 71. Medições dos data loggers demonstrando as temperaturas externa e interna.
Fonte: Cotta (2012).

4.2.5 Ventilação natural

Como exposto anteriormente neste capítulo, alcançar o conforto térmico em climas quentes e úmidos depende muito do movimento do ar para compensar o desconforto causado pelas altas taxas de umidade. No entanto, as medições dos data loggers ao longo da semana demonstraram que os níveis internos de umidade relativa do ar estavam abaixo do limite estabelecido pelo CIBSE (2019) para ambientes de trabalho (70%), possuindo um valor médio de 65%.

Durante a visita, foram realizadas medições de velocidades de vento nos ambientes internos de trabalho durante o período de uma hora. As velocidades medidas variaram entre 0,5 e 1,0 m/s com alguns picos chegando a 2,8 m/s, e mesmo nessas condições, não foram reportadas reclamações em relação a correntes desconfortáveis de vento. Além disso, 80% dos ocupantes que responderam aos questionários afirmaram que durante aquele dia prefeririam inclusive mais movimento do ar. Em contrapartida, durante as entrevistas ficou claro que as correntes de ar nas estações de trabalho próximas das janelas são um dos maiores fatores para o aumento da insatisfação dos usuários que ocupam aquela região da planta. A tipologia de janela Maxim-ar (Figura 72) não permite que os ocupantes tenham um controle adequado do movimento do ar. A prefeitura está localizada no topo de um morro, sem obstruções de vento, o que aumenta as velocidades de ar consideravelmente dentro

e no entorno do edifício. Os funcionários sentados próximos das janelas reclamam de velocidades de ar excessivas, ao passo que os que ocupam as estações próximas do centro da planta geralmente se sentem agradáveis com relação à quantidade de movimentação do ar. Em contrapartida, os funcionários próximos do corredor reclamam de quase não haver movimento do ar. A Figura 73 mostra uma simulação de CFD que ilustra as afirmações dos ocupantes, comprovando que as velocidades do ar são de fato maiores próximo das janelas e muito baixas próximo do átrio.

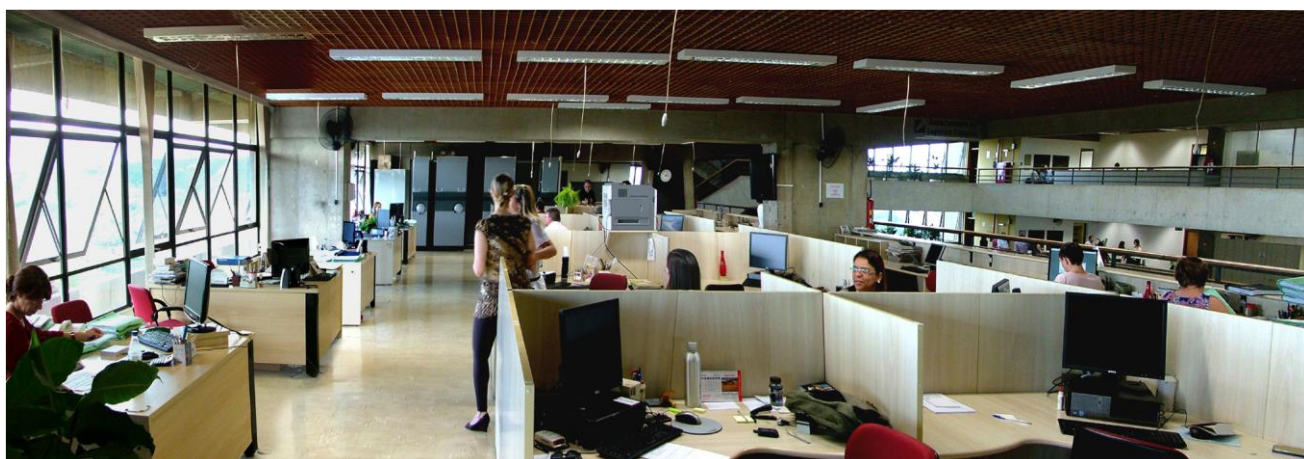


Figura 72. Foto interna demonstrando o layout open plan no quarto pavimento.
Fonte: Cotta (2012).

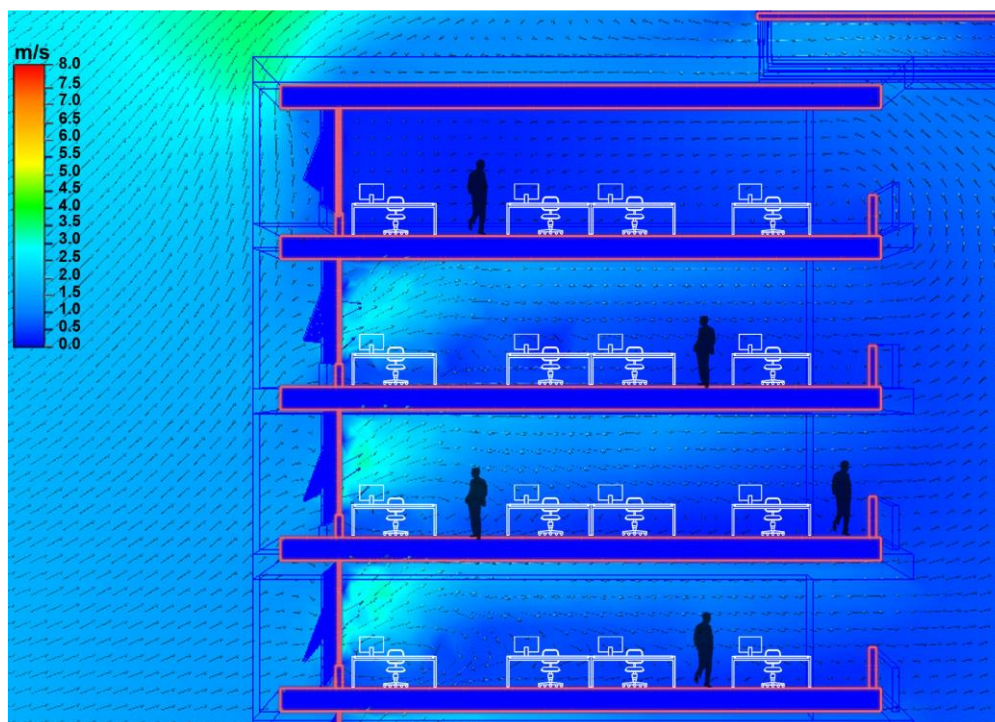


Figura 73. Simulação de CFD demonstrando velocidades elevadas de vento nas áreas adjacentes às janelas.
Fonte: Cotta (2012).

O controle das janelas e persianas em edifícios de planta livre é também uma grande fonte de insatisfação dos ocupantes. Geralmente, os ocupantes tentam chegar a um acordo entre eles em relação a como operar os elementos adaptativos. A maior questão é que, mesmo durante alguns dias de inverno e outono, os ocupantes sentem a necessidade de abrir as janelas para sentirem o ar fresco, então os funcionários próximos das janelas se sentem bastante desconfortáveis durante a maior parte do tempo. Uma das funcionárias afirmou ter tido sinusite três vezes em um período de seis meses por causa das correntes de ar frio. Outra questão importante é que alguns ocupantes (especialmente mulheres) possuem um grau maior de sensibilidade com relação ao fluxo de ar. Para este problema, uma boa solução é oferecer um layout mais flexível em que cada funcionário possa escolher o melhor local para trabalhar, levando em consideração as suas preferências térmicas.

4.2.6 Considerações finais da pesquisa de campo

Após pesquisa de campo é possível concluir que o edifício tem um projeto resiliente e que com uma pequena requalificação na envoltória do edifício, que abranja um projeto de janelas mais adequado, é possível melhorar tanto o desempenho térmico como o luminoso dos ambientes de trabalho. Ficou evidente também que o controle do fluxo de ar no projeto das janelas é fator fundamental para garantir o conforto dos usuários.

Ademais, o edifício sofreu algumas intervenções que não contribuíram para que ele operasse exatamente da forma como foi projetado originalmente. Um exemplo disso é o pavimento térreo, que era parcialmente aberto, possibilitando a entrada de ar na parte mais baixa do átrio de forma ininterrupta e não submetida à operação de janelas por parte dos usuários, como está sendo feita atualmente nos pavimentos. Posteriormente o pavimento térreo foi todo fechado para abrigar mais postos de trabalho.

Outro aspecto que não contribui para um melhor desempenho ambiental do átrio é que a área de saída de ar na cobertura é muito pequena, como pode ser visto na Figura 74. Então, do modo como o edifício está funcionando na atualidade, praticamente todo o ar que entra e sai pelo átrio é controlado pelas janelas que estão

nos blocos das estações de trabalho dos pavimentos. E este aspecto reduz significativamente o potencial de ventilação de todo o prédio.



Figura 74. Foto da cobertura do átrio central, demonstrando a ausência de aberturas de ventilação para saída do ar.

Fonte: Cotta (2012).

4.3 ESTUDOS ANALÍTICOS PARA ESTRATÉGIAS DE SOMBREAMENTO DE FACHADAS EM SÃO PAULO

Na cidade de São Paulo, o controle solar em todas as orientações expostas deve ser a primeira estratégia a ser considerada quando se decide por adotar a ventilação natural como método de resfriamento passivo dos ambientes de trabalho. Como sabido, o sombreamento externo tem uma eficácia superior quando comparado ao uso de persianas internas, que permitem que grande parte da radiação solar seja admitida no interior do edifício, além de obstruírem a luz natural, resultando em uma maior dependência de iluminação artificial e, consequentemente, maior consumo energético.

Cabe ainda ressaltar outro aspecto negativo do uso de persianas como única estratégia de controle solar que é a obstrução de vistas, sendo estas, de acordo com

diferentes pesquisas (NE'EMAN; HOPKINSON, 1970; KEIGHLEY, 1973; WELLS, 1996; OSTERHAUS, 2001), de extrema importância, podendo aumentar consideravelmente o nível de satisfação e produtividade dos usuários em edifícios de escritório.

Adicionalmente, o clima da cidade de São Paulo apresenta uma peculiaridade que exige atenção extra na minimização dos ganhos de calor resultantes da radiação solar. A Figura 75 mostra que, ao longo do ano, as quantidades de radiação solar direta e difusa incidentes em um plano horizontal são bastante semelhantes. Isso ocorre em razão da alta frequência de céu na condição encoberta, com o expressivo percentual de 60% das ocorrências anuais. Uma das estratégias mais eficientes no bloqueio da radiação difusa é a redução das áreas envidraçadas. Por essa razão, entende-se que a proporção entre as superfícies transparentes e opacas na fachada (WWR: *window-to-wall-ratio*) é de grande importância no desempenho térmico do edifício.

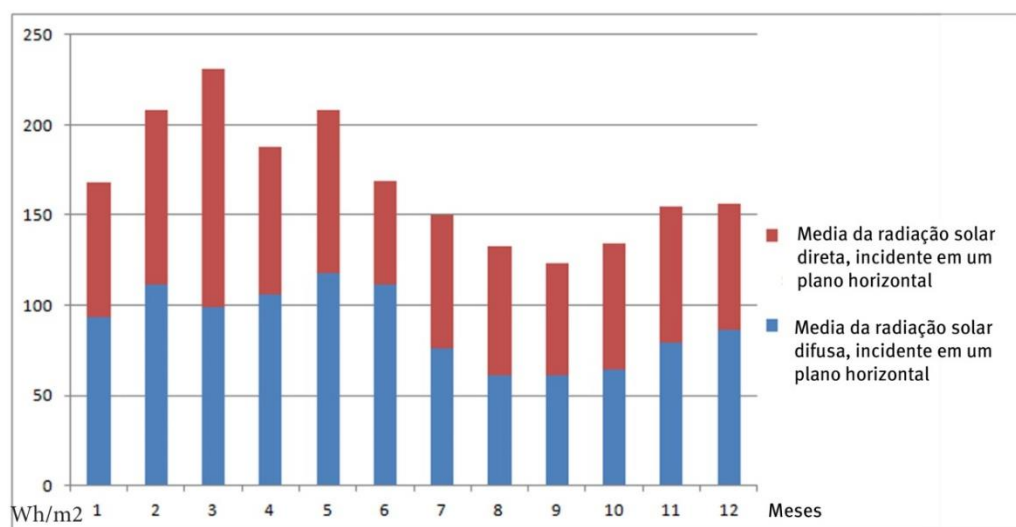


Figura 75. Média da radiação horizontal direta e difusa na cidade de São Paulo. Os dados de radiação foram extraídos do banco de dados do programa Meteonorm 6.1.

Fonte: Meteotest, 2009.

A investigação das melhores tipologias de sombreamento para cada orientação no clima de São Paulo foi foco dos estudos analíticos realizados por Cotta (2012), cujas principais etapas, questionamentos e resultados são apresentados na seção 4.3.1 deste capítulo. Três modelos de fachada foram testados para quatro diferentes orientações (norte, sul, leste, oeste), com o recurso de simulações de desempenho

térmico realizadas com o software TAS-Version 9.1.4.2 (EDSL, 2012). Ademais, os softwares Ecotect (AUTODESK, 2012) e Radiance (RADIANCE, 2012) também foram utilizadas para checagem dos níveis de luz natural e eficácia dos elementos de sombreamento.

4.3.1 Estudos analíticos

Os estudos realizados por Cotta (2012) focaram inicialmente em verificar a eficácia dos dispositivos de sombreamento para cada orientação, utilizando cartas solares, nas quais a trajetória do sol ao longo do ano é projetada. A carta solar, quando aplicada em uma determinada fachada, demonstra com precisão em quais períodos do ano a radiação solar direta é bloqueada.

Em seguida, após confirmar a melhor tipologia de sombreamento para cada orientação, os desempenhos térmicos de três cenários foram testados: WWR (*window-to-wall-ratio*) de 100% representando a fachada cortina de vidro; WWR de 100% com adição de sombreamento externo; e WWR de 50% também com sombreamento externo. O objetivo dessas simulações foi o de mensurar a quantidade de radiação difusa admitida nos ambientes internos, em diferentes configurações de fachada.

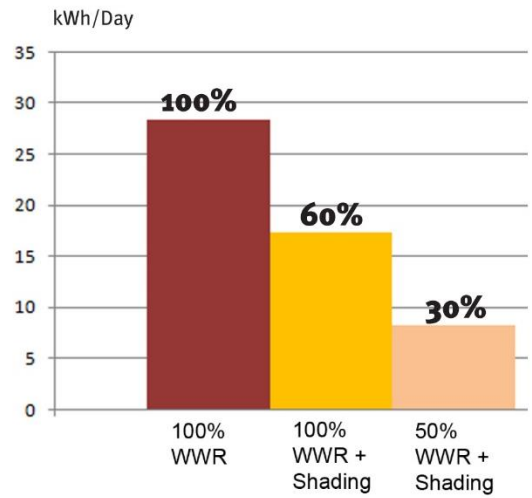
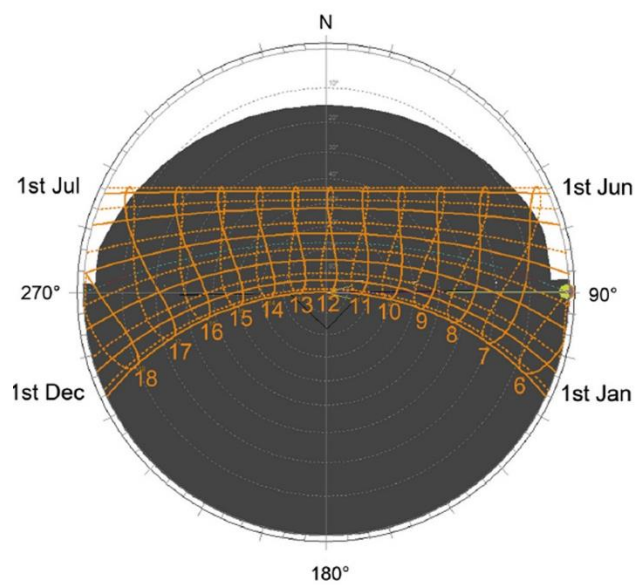
Nessa sequência de simulações, os ambientes de escritório foram considerados sem ocupação, em condições similares ao que é encontrado nos fins de semana em edifícios de escritório reais. As janelas foram consideradas fechadas, desse modo a única fonte de ventilação do ambiente seria a infiltração. Excluir o efeito dos ganhos internos provenientes de ocupação fornece um entendimento mais claro em relação a como os ganhos de calor solar estão impactando nas temperaturas internas. Além disso, é possível quantificar como a estratégia de controle solar está contribuindo para reduzir as variações internas de temperatura.

Em todas as simulações foi utilizado o vidro laminado incolor 8 mm, em virtude das suas altas propriedades de transmitância luminosa, permitindo assim maior independência da iluminação artificial.

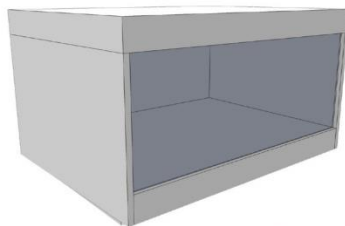
Por fim, os níveis de iluminação natural foram checados para os cenários de melhor desempenho. As simulações consideraram o céu na condição de encoberto,

às 9h da manhã (início da jornada de trabalho). Este critério foi adotado considerando que, se os ocupantes possuísssem luz natural suficiente quando chegassem aos seus escritórios, não iriam acender as luzes artificiais, o que, no caso de edifícios com apenas controles manuais, iria prevenir contra o uso das luzes ao longo de todo o dia. Outro critério adotado foi o de evitar a radiação direta dentro dos espaços de trabalho após as 9h, pois isso poderia levar ao fechamento das persianas e ao acionamento das luzes artificiais. A faixa de conforto adotada para os níveis de iluminação natural variou entre 200 lux e 2.000 lux (CIBSE, 2019).

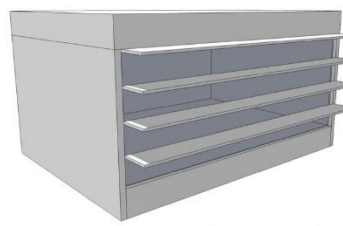
4.3.1.1 Norte



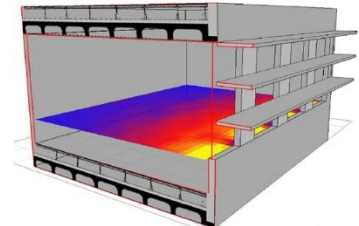
Solar gains (absorbed + transmitted) reduction
(Source: EDSL Tas)



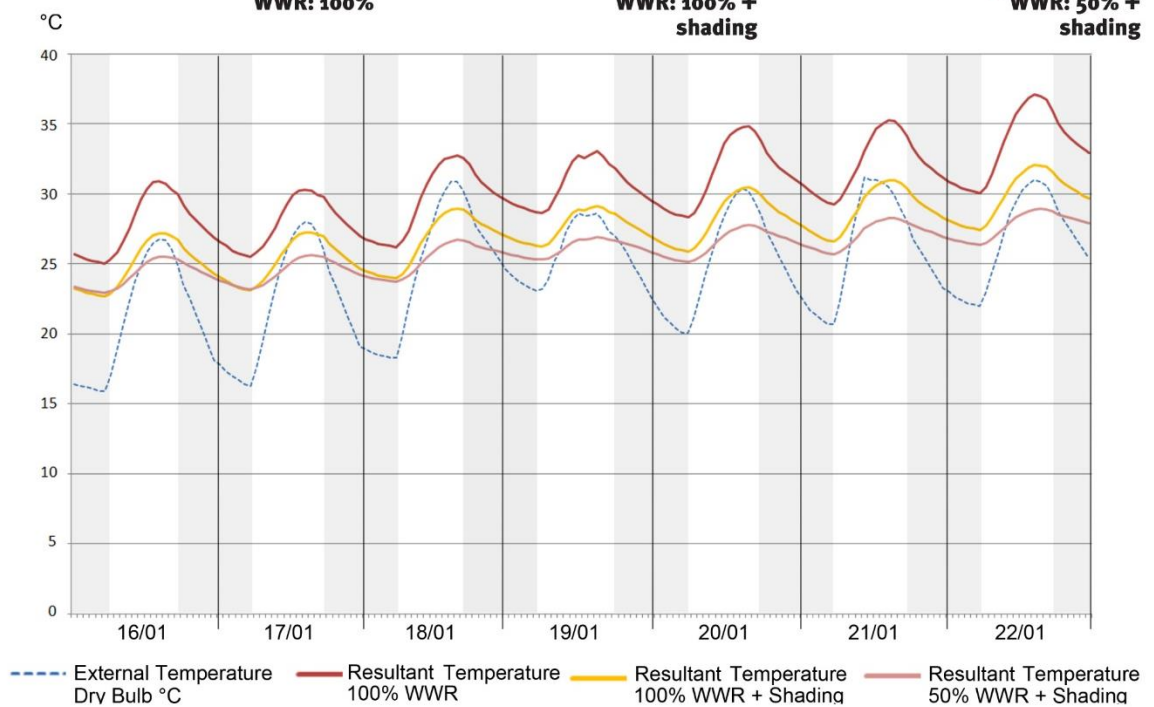
WWR: 100%



WWR: 100% +
shading



WWR: 50% +
shading



Typical summer week thermal simulation (Source: EDSL Tas)

Figura 76. Carta solar para fachada norte, gráfico de barras com a variação dos ganhos solares (absorvidos e transmitidos pela fachada) em três cenários de WWR, gráfico de linhas com a variação de temperaturas nos modelos simulados em cada uma das três configurações de fachada testadas e simulação de iluminação natural para o cenário de melhor desempenho térmico.

Fonte: Cotta (2012).

Nas fachadas voltadas para a orientação norte, foram propostos dispositivos horizontais de sombreamento em resposta aos ângulos solares, de acordo com as recomendações de Yannas (2000). A carta solar apresentada na figura 76 confirma a eficácia dessa tipologia de sombreamento, bloqueando a radiação direta após as 8h durante todo o ano.

Com relação ao desempenho térmico dos ambientes de trabalho, verifica-se que a aplicação de sombreamento externo em uma fachada completamente envidraçada pode reduzir os ganhos de calor solar em 40%. No entanto, quando considerado um WWR de 50%, é possível alcançar uma redução adicional de mais 30% nos ganhos solares. O gráfico de linhas da Figura 76 demonstra que com essa estratégia de controle solar é possível reduzir em até 7°C a temperatura interna, em comparação com uma fachada envidraçada sem sombreamento externo.

No que tange ao desempenho luminoso, ao mesmo passo que a fachada cortina de vidro fornece uma boa quantidade de penetração da luz natural, o ofuscamento pode se apresentar como um problema, especialmente nas partes do ambiente mais próximas da fachada. Em contrapartida, o cenário com sombreamento e WWR de 50% apresenta níveis altos de iluminância no perímetro da planta (900 lux), mas que ainda estão dentro da faixa de conforto. Na parte mais profunda da planta, foram encontrados níveis mínimos aceitáveis de iluminância (200 lux), demonstrando que, dentro da zona passiva de iluminação (até 6 metros de profundidade), esse sistema de fachada pode proporcionar independência em relação ao uso de iluminação artificial.

A composição horizontal dos elementos de sombreamento também possui outro benefício com relação às vistas, proporcionando uma conexão visual ininterrupta com o exterior. Esta característica é bastante valorizada pelos usuários.

4.3.1.2 Sul

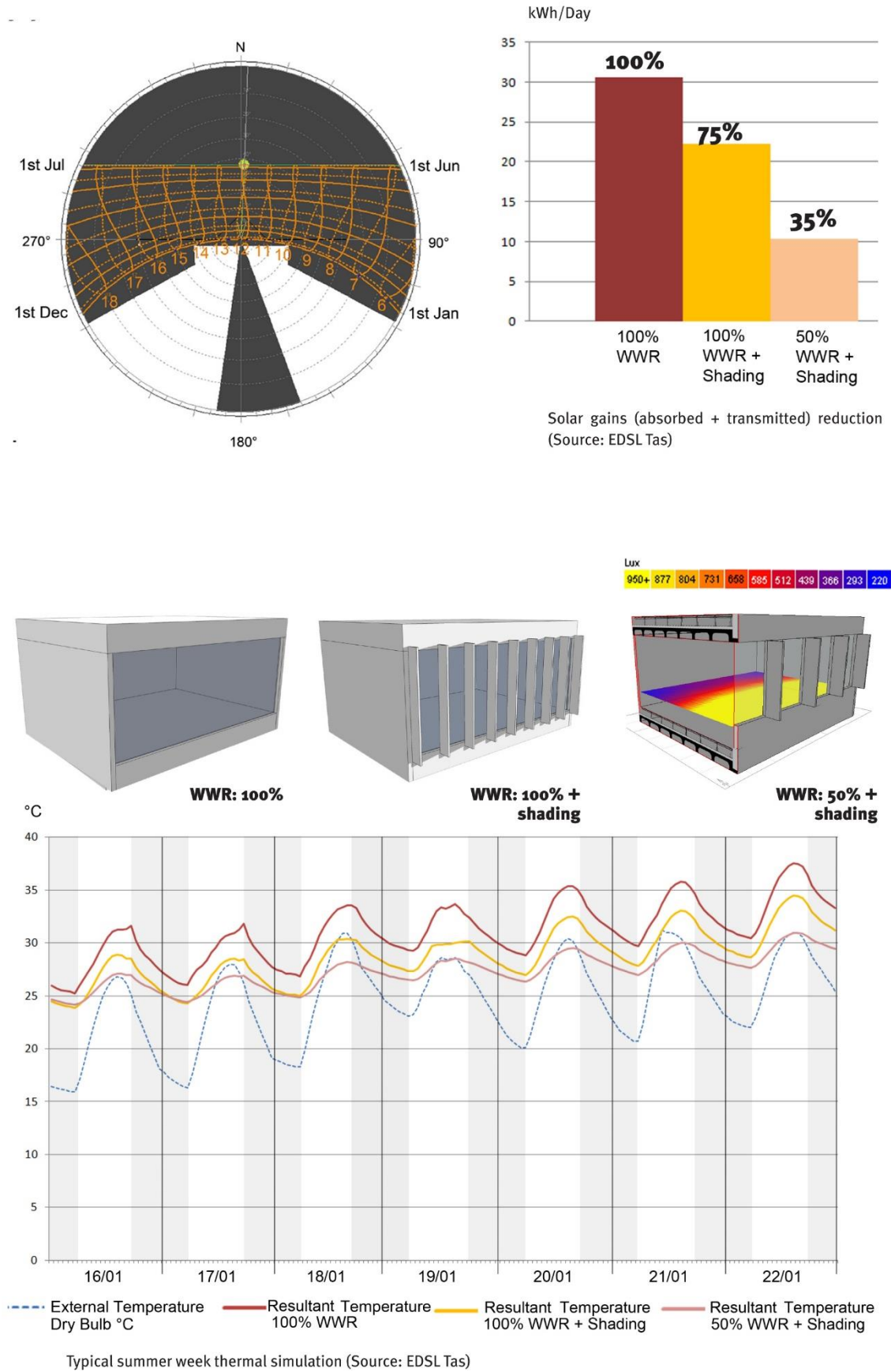


Figura 77. Carta solar para fachada sul, gráfico de barras com a variação dos ganhos solares (absorvidos e transmitidos pela fachada) em três cenários de WWR, gráfico de linhas com a variação de temperaturas nos modelos simulados em cada uma das três configurações de fachada testadas e simulação de iluminação natural para o cenário de melhor desempenho térmico.

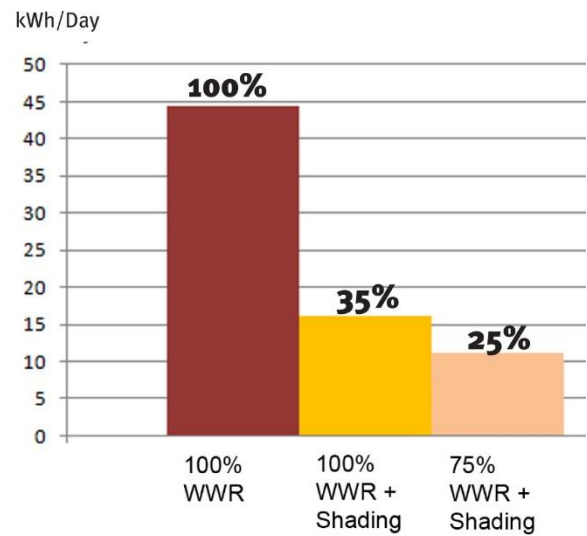
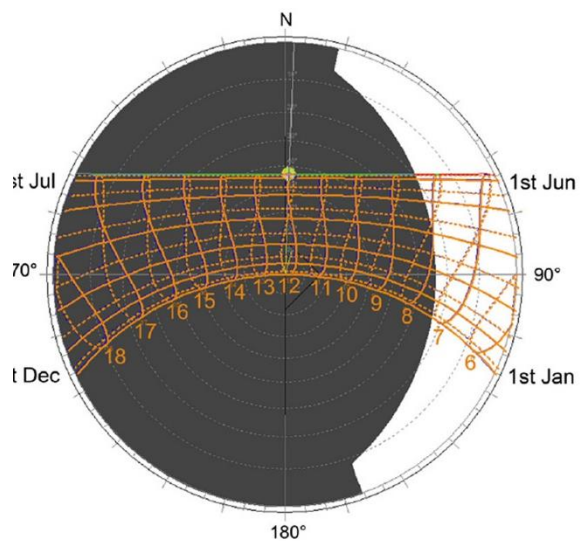
Fonte: Cotta (2012).

Para a orientação sul, os dispositivos verticais de sombreamento foram propostos de modo a bloquear a radiação solar incidente nas primeiras horas da manhã e no fim da tarde, nos meses de verão. A carta solar apresentada na Figura 77 confirma a eficácia dessa tipologia de sombreamento, bloqueando a radiação direta durante todas as horas do ano.

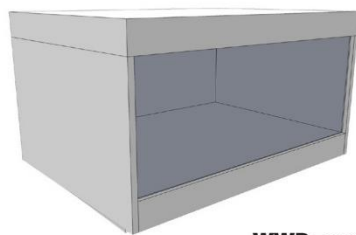
Com relação ao desempenho térmico dos ambientes de trabalho, verifica-se que a aplicação de sombreamento externo está reduzindo apenas 25% dos ganhos de calor solar, 15% a menos do que na fachada norte. O principal motivo para isso é que a tipologia de sombreamento vertical permite maior exposição das áreas envidraçadas à radiação solar difusa, que está atrelada ao quanto de visão do céu se tem a partir das áreas internas. Essa maior radiação difusa se reflete também nos níveis de luz natural na planta, que são significativamente maiores do que na fachada norte. Em contrapartida, quando o WWR é reduzido para 50%, nota-se uma queda de 65% dos ganhos solares em relação ao caso-base, demonstrando que o impacto da redução de WWR como estratégia de controle solar é ainda mais relevante na orientação sul.

Como pode ser visto no gráfico de linha da Figura 77, a redução total dos ganhos solares absorvidos e transmitidos para o ambiente proporciona temperaturas internas mais amenas, no entanto as temperaturas são em média 2,5°K mais quentes que no modelo simulado para fachada norte. Isso demonstra que, mesmo com a redução de WWR, a composição horizontal dos elementos de sombreamento ainda permite maior radiação difusa incidente.

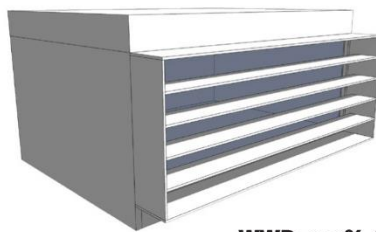
4.3.1.3 Leste



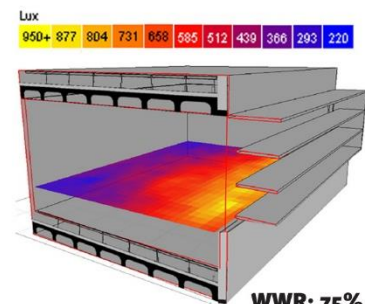
Solar gains (absorbed + transmitted) reduction
(Source: EDSL Tas)



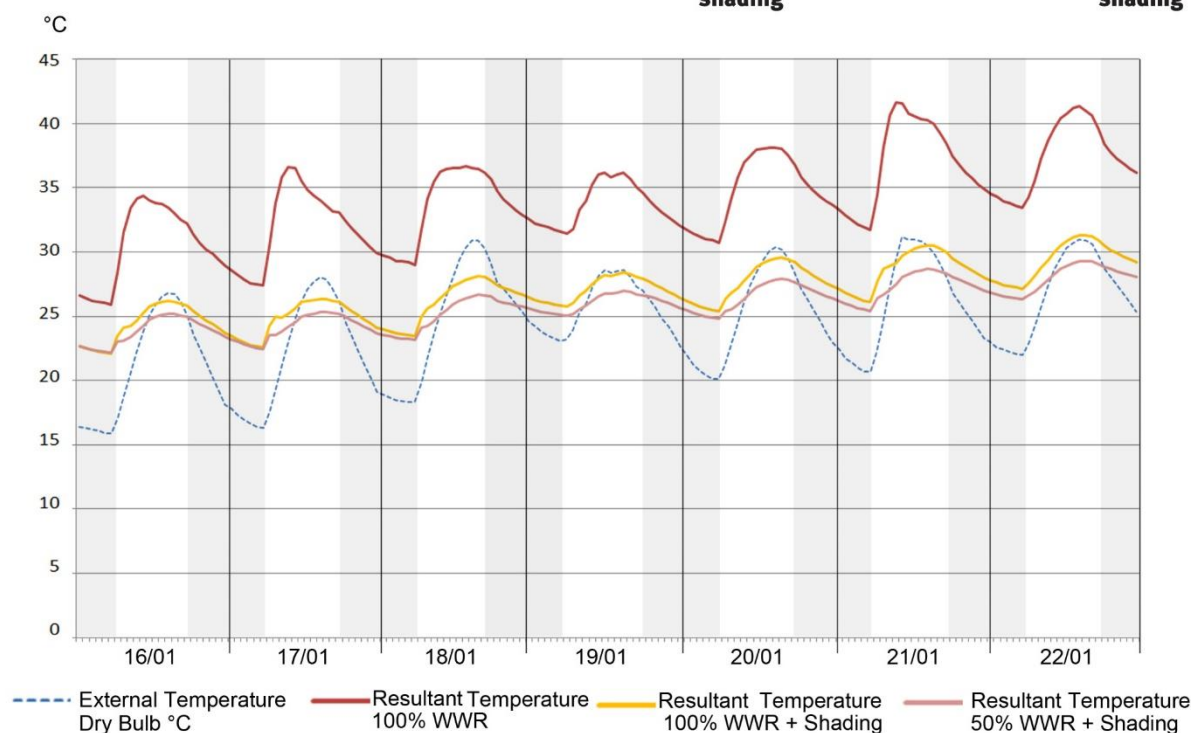
WWR: 100%



**WWR: 100% +
shading**



**WWR: 75% +
shading**



Typical summer week thermal simulation (Source: EDSL Tas)

Figura 78. Carta solar para fachada leste, gráfico de barras com a variação dos ganhos solares (absorvidos e transmitidos pela fachada) em três cenários de WWR, gráfico de linhas com a variação de temperaturas nos modelos simulados em cada uma das três configurações de fachada testadas e simulação de iluminação natural para o cenário de melhor desempenho térmico.

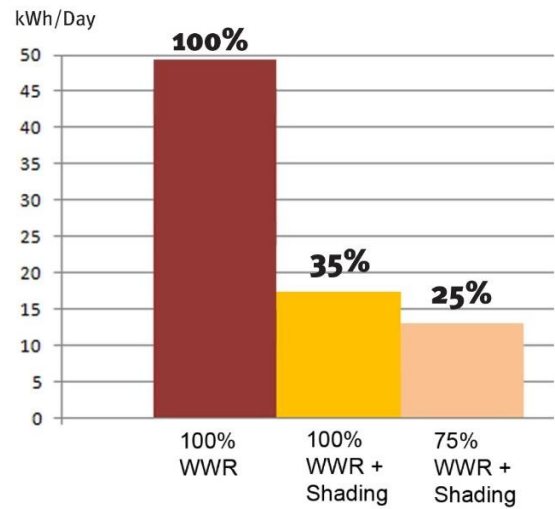
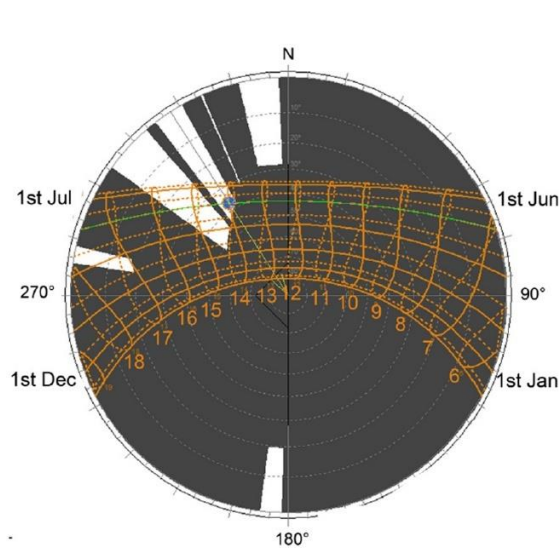
Fonte: Cotta (2012).

Para a orientação leste, foi proposto um sistema de sombreamento com dispositivos horizontais mais profundos, diferentemente dos brises verticais que são recomendados por Yannas (2000). Esse partido de projeto foi adotado com o objetivo de testar a eficácia de um sistema que pudesse fornecer melhores vistas externas e melhores níveis de iluminação natural. A carta solar apresentada na Figura 78 confirma a eficácia dessa tipologia de sombreamento, bloqueando a radiação direta após as 9h durante todo o ano.

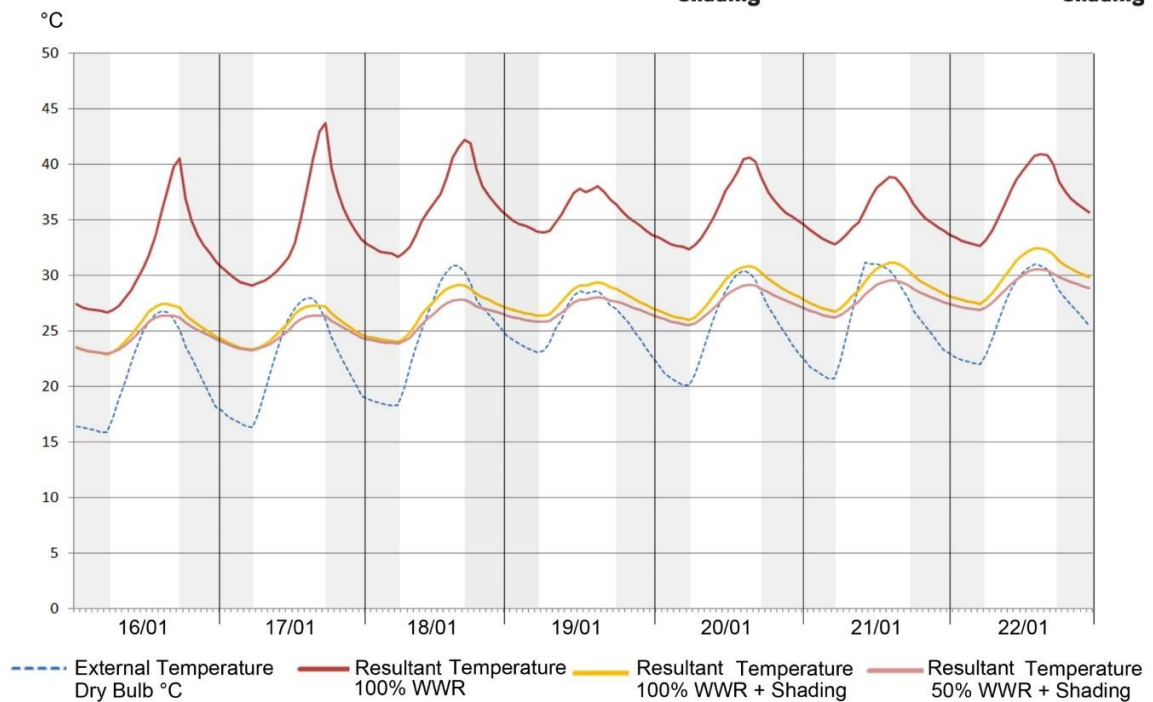
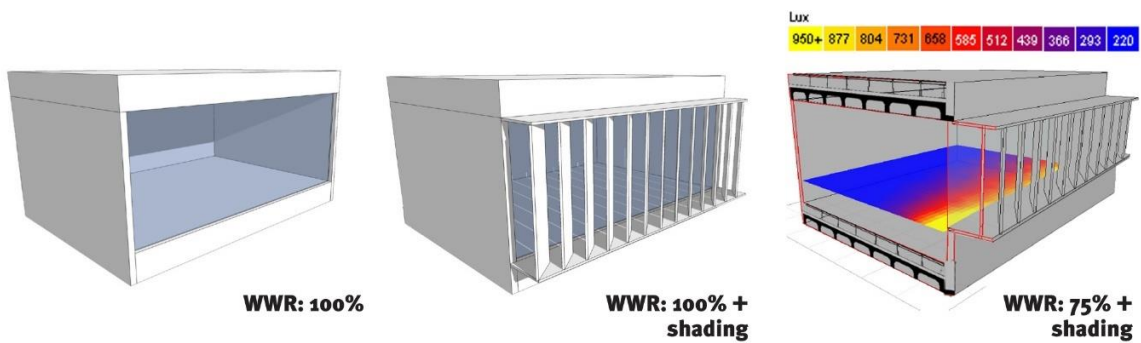
Com relação ao desempenho térmico dos ambientes de trabalho, verifica-se que nessa orientação foram encontrados ganhos de calor solar significativamente maiores que nas orientações norte e sul (45 kWh/dia em comparação com 30 e 28 kWh/dia nas orientações norte sul, respectivamente). Adicionalmente a contribuição dos dispositivos de controle solar, no sentido de bloquear a radiação direta e difusa, é muito mais efetiva nesta orientação, reduzindo os ganhos solares em 65%. Neste caso a redução de WWR contribui apenas para uma redução adicional de mais 10%. Vale ressaltar que o WWR considerado para esta orientação é de 75% e não 50% como nas orientações norte e sul. Esta premissa foi adotada levando em consideração que a tipologia de sombreamento já contribui para reduzir a radiação difusa, desse modo maior área envidraçada na fachada pode proporcionar melhores níveis de luz natural e vistas.

A simulação de iluminação natural no cenário com WWR reduzido e sombreamento demonstra que essa configuração de fachada foi a que proporcionou melhor qualidade de luz natural, em razão da distribuição mais uniforme dos níveis de iluminância através da planta (BAKER; STEEMERS, 2002).

4.3.1.4 Oeste



Solar gains (absorbed + transmitted) reduction
(Source: EDSL Tas)



Typical summer week thermal simulation (Source: EDSL Tas)

Figura 79. Carta solar para fachada oeste, gráfico de barras com a variação dos ganhos solares (absorvidos e transmitidos pela fachada) em três cenários de WWR, gráfico de linhas com a variação de temperaturas nos modelos simulados em cada uma das três configurações de fachada testadas e simulação de iluminação natural para o cenário de melhor desempenho térmico.

Fonte: Cotta (2012).

A orientação oeste apresenta problemas similares aos da leste: os ângulos solares baixos demandam dispositivos de sombreamento verticais para bloquear o máximo possível de radiação solar direta. Na orientação leste, as horas de ocupação auxiliam com esse problema, considerando que os ângulos solares são muito baixos no início das manhãs, quando o escritório não está ocupado, e os níveis de radiação solar não são tão altos. No entanto, para a orientação oeste, o horário de ocupação não compensa esse problema e, portanto, dispositivos de sombreamento horizontais foram excluídos para este caso. A carta solar da Figura 79 demonstra que os dispositivos de sombreamento verticais podem bloquear a radiação solar direta no verão, no entanto, para um controle solar efetivo ao longo do ano, seria necessário utilizar brises verticais móveis, que poderiam mudar de acordo com a estação do ano.

No que tange ao desempenho térmico dos ambientes de trabalho, a orientação oeste apresentou ganhos solares ainda mais elevados que na fachada leste, com 49 kWh/dia no cenário sem sombreamento. Quando aplicados sombreamento e redução de WWR, foi possível alcançar reduções similares às da fachada leste (35% e 25% respectivamente).

Os brises verticais geram um efeito de redução significativa da iluminação natural em toda a área de trabalho. Na parte mais profunda da planta, foram encontrados os níveis mais baixos de iluminância entre todas as orientações (160 lux). No entanto, é importante ressaltar que, mesmo que este valor tenha ficado abaixo da zona de conforto adotada, ele ainda pode ser aceito de acordo com Baker (2002), quando ele observa que o nível de iluminação mínimo para atividades que sejam desempenhadas em telas de computador é de 150 lux.

4.3.2 Considerações finais: estudos de sombreamento

Os resultados das simulações demonstram que a vantagem da redução de WWR das fachadas é mais significativa nas orientações norte e sul, nas quais foi possível reduzir os ganhos de calor solar em 30% e 40% respectivamente, em comparação com uma fachada cortina de vidro, mesmo com sombreamento. Em contrapartida, nas orientações leste e oeste essa redução é menos relevante, já que os dispositivos de proteção solar reduzem os ganhos de calor solar em 65% e a redução de WWR só contribui com 10%.

Apesar de a maior redução dos ganhos de calor solar ter sido alcançada nas orientações leste e oeste, as orientações norte e sul apresentaram as menores quantidades de ganhos de calor solar transmitido para o ambiente (10 e 7 kWh/dia, respectivamente), uma vez que estas recebem menor incidência de radiação ao longo do verão.

Capítulo 5

CAPÍTULO 5. MÉTODO DA PESQUISA

Este capítulo traz a descrição dos procedimentos metodológicos dos estudos analíticos, incluindo: a construção do caso-base de simulação e seu detalhamento no que tange às características construtivas, ao padrão de ocupação, assim como aos cenários alternativos de teste, seguidos pelas etapas das simulações computacionais e dos critérios para a análise dos resultados.

Os estudos analíticos partiram de duas formas de planta (quadrada e retangular) que são encontradas com maior frequência nos edifícios de escritório em São Paulo projetados desde o ano 2000. A partir dessas tipologias, foram definidos os casos-base das simulações computacionais. Os estudos analíticos tiveram como principais objetivos:

- Avaliar o impacto da inserção de átrios e vazios para incremento da ventilação natural, no desempenho térmico dos espaços de trabalho ao longo do ano.
- Avaliar o potencial de ventilação natural de cada tipologia de átrio em comparação com o caso-base e como o sistema de ventilação proposto se comporta com e sem a presença de vento externo.
- Avaliar o desempenho energético de cada um dos cenários alternativos de teste.

O fluxograma a seguir ilustra as diversas tarefas executadas durante a pesquisa, bem como a ordem na qual estas foram realizadas.

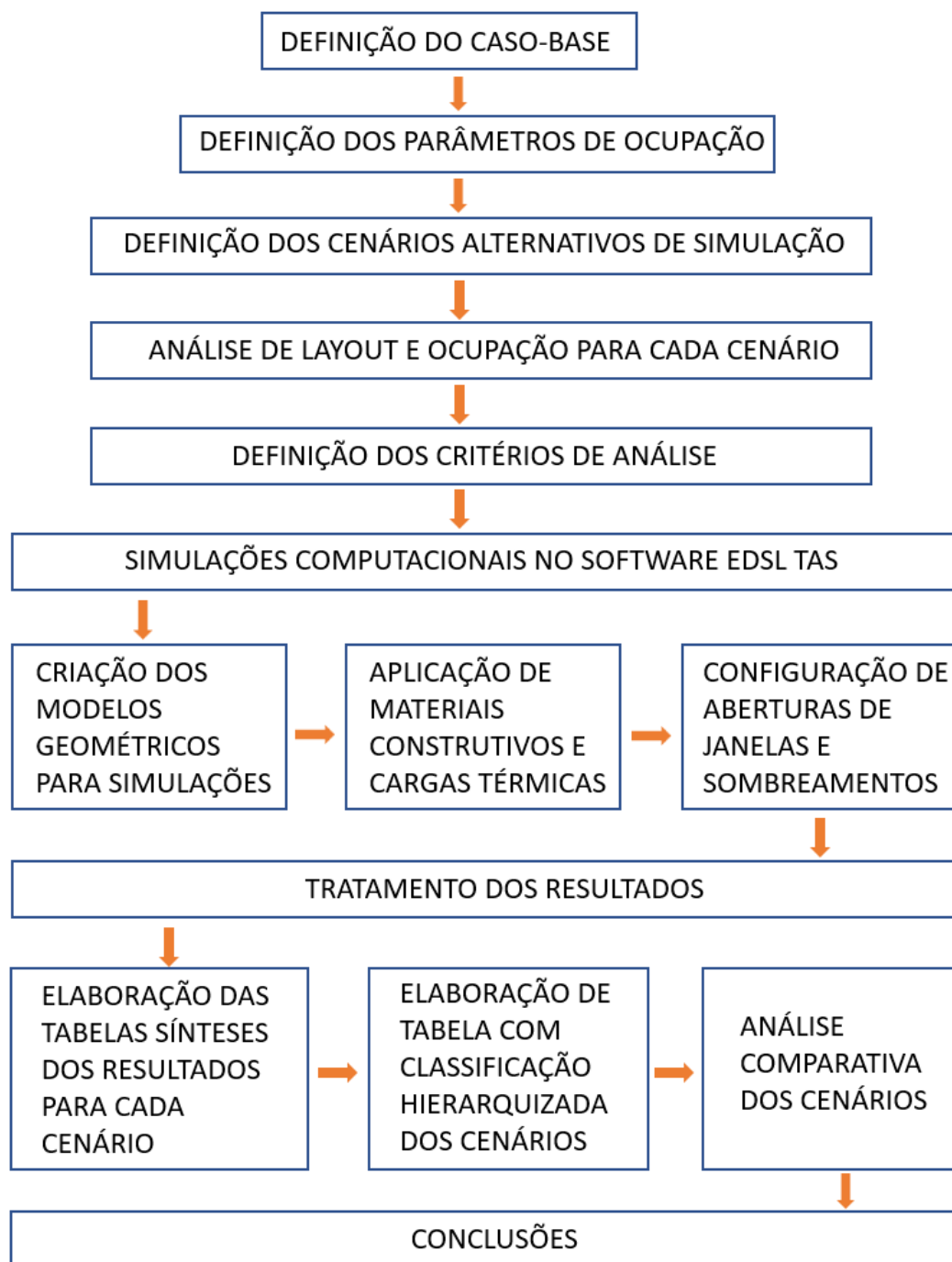


Figura 80. Fluxograma com as etapas dos estudos analíticos.

Fonte: autor da tese.

5.1 CASO-BASE

Para os estudos analíticos de simulações computacionais, a pesquisa partiu de um modelo de referência, que teve como base o levantamento realizado por Pereira (2017), no qual foram analisados 28 edifícios de escritório construídos em São Paulo entre os anos 2000 e 2016, com enfoque em edificações que receberam certificações LEED ou AQUA.

O levantamento focou em aspectos construtivos das edificações e gerou uma ficha para cada edifício detalhando relevantes características arquitetônicas, sendo estas:

- Formato de planta;
- Proteção solar: se existe proteção externa (brises) ou proteção interna (telas solares, etc.);
- Verificação quanto a se há ou não núcleo central (*core*);
- Profundidade de planta;
- Tipo de vidro utilizado com dados de transmissão luminosa (TL) e fator solar do vidro (FS);
- WWR (*window-to-wall-ratio*) das fachadas;
- Pé-direito do ambiente.

Após análise dos dados, foi possível identificar as principais características para a tipologia local conforme apresentado a seguir:

- A planta do pavimento tipo tem formato predominantemente quadrado ou retangular com núcleo central de serviços. Cerca de 40,5% dos casos estudados apresentam área líquida locável (área útil) do pavimento tipo entre 1.000 e 1.500 m²; 32,4% entre 1.600 e 1.900 m²; 21,6% entre 400 e 900 m²; e 5,4% entre 2.000 e 3.000 m².
- As fachadas são predominantemente compostas pelo conhecido “sistema cortina de vidro”, de esquadrias seladas, sem proteção solar externa e com WWR variando entre 40% e 100%. Os elementos opacos da fachada são

geralmente compostos pelo sistema de fechamento do tipo *spandrel panel* (sistema de fechamento com vidro opaco com isolamento térmico interno) ou painel de ACM (*aluminium composite material*) com isolamento interno.

- Os vidros, em sua maioria (61,5% dos casos), apresentaram fator solar (FS) entre 25% e 38%. Vale ressaltar que o FS 36% foi o de maior ocorrência.
- A transmissão luminosa variou entre 19% e 35%.
- Na maior parte dos edifícios analisados, a profundidade da planta, da fachada até o núcleo de serviços, varia entre 10 e 16 m (64,7%). Além disso 23,5% apresentaram profundidades entre 5 e 9 m. Somente 11% apresentaram valores superiores a 17 m.
- A área do *core* central (núcleo de serviços) tem predominantemente 1/3 da área útil do pavimento tipo.
- O pé-direito (piso a forro) de 2,80 m apresentou maior frequência de ocorrência, estando presente em 46% dos casos. Nos demais, este variou entre 2,70 m e 3,20 m.

Com base no levantamento realizado por Pereira (2017), foram concebidos dois modelos de caso-base para o edifício de escritórios, sendo o primeiro com planta quadrada e o segundo com planta retangular. As principais características dos referidos modelos são:

- Um núcleo central ocupando aproximadamente 1/3 da área útil do pavimento tipo.
- Pé-direito livre de 3,20 m, considerando que serão removidos os forros e a laje de concreto ficará aparente (vale ressaltar que essa abordagem de projeto é uma grande tendência nos novos escritórios implantados nessas edificações).

- Profundidade de planta de 10 m (adotada como profundidade média entre os edifícios analisados).
- WWR de 50% em todas as fachadas. Essa proporção foi adotada em conformidade com as recomendações dos estudos analíticos realizados por Cotta (2012) demonstradas no capítulo 4. Nas orientações leste e oeste, diferentemente do WWR de 25% proposto por Cotta (2012), adotou-se WWR de 50%, a fim de simplificar o modelo. Essa abordagem de projeto levou em consideração que o aumento de WWR não terá impacto negativo nas estratégias de ventilação natural, pois contribuirá para reduzir ainda mais os ganhos de calor solar provenientes da radiação difusa.
- Áreas úteis das plantas quadradas e retangulares são de 1.200 m² e 1.600 m², respectivamente.
- Edifícios com 36 pavimentos.

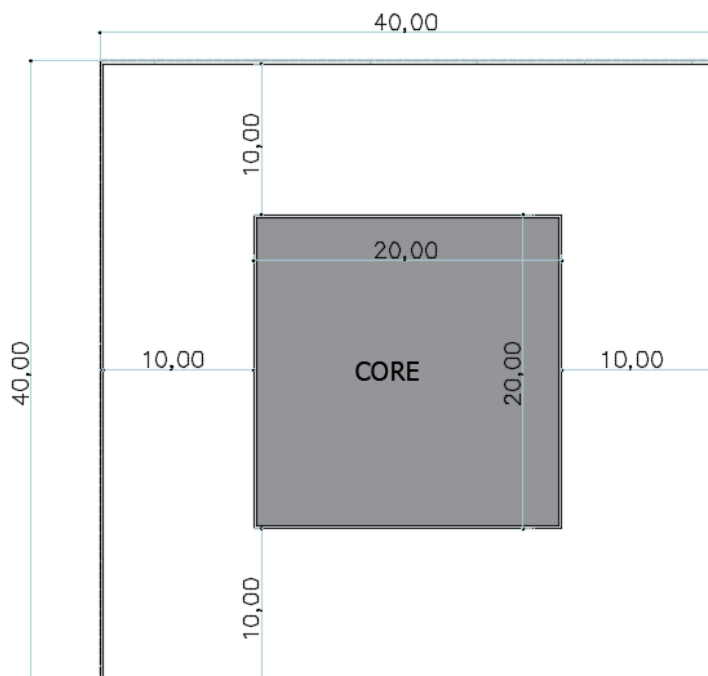


Figura 81. Planta baixa. Caso-base com planta quadrada.

Fonte: autor da tese.

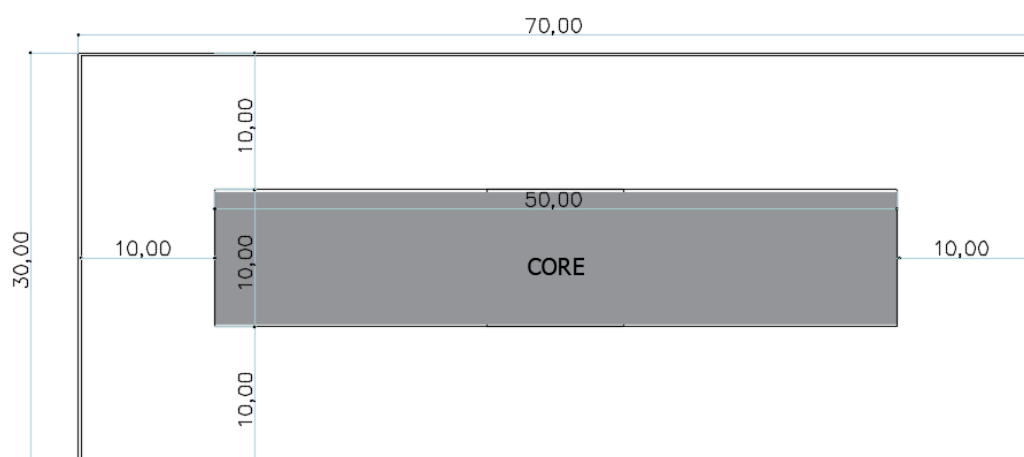


Figura 82. Planta baixa. Caso-base com planta retangular.

Fonte: autor da tese

5.2 PARÂMETROS DE OCUPAÇÃO

Sabe-se que a densidade de ocupação e o tipo de tarefas que são realizadas dentro de um edifício exercem uma influência direta no desempenho térmico dos espaços internos. Para os ambientes de escritório, existe um grande leque de possibilidades de ocupação que podem impactar diretamente na carga térmica. Em alguns casos estes ganhos de calor interno provenientes de ocupação podem se tornar um desafio maior do que o próprio clima para implementação de estratégias passivas de resfriamento (GONÇALVES; BODE, 2015). Como mencionado na Introdução, a partir do ano 2000 o layout *open plan* passou a ser uma tendência mundial e um dos fatores que levaram a isso foi a possibilidade de esse layout permitir uma densidade de ocupação significativamente superior aos modelos anteriores. No entanto, mais recentemente a natureza do trabalho em escritórios mudou consideravelmente, exigindo, além dos postos de trabalho, mais espaços diversificados (como espaços colaborativos, de brainstorm e de relaxamento) que normalmente apresentam uma densidade menor de ocupação. Este movimento vem contribuindo para contrabalancear a ascensão da tendência anterior de alta densidade nos escritórios.

Em São Paulo, a densidade máxima aceita pelo Corpo de Bombeiros Estadual é de 7 m² de área útil por pessoa (GONÇALVES; BODE, 2015). Adicionalmente a

norma brasileira NBR 9077 (2001) recomenda o mesmo parâmetro para o cálculo da população a ser escoada no dimensionamento de escadas de emergência. Em contrapartida, Marcondes (2010) e Andrade (2005) sugerem que a taxa de ocupação de 10 m² por pessoa seja adotada como a taxa que melhor representa um contexto mais atual dos escritórios no nível internacional e que também pode ser considerada tendência para São Paulo, quando levado em consideração este novo conceito de escritórios com mais áreas colaborativas, configurando assim um padrão de ocupação mais eficiente. Desse modo, a densidade adotada para as simulações computacionais desta tese será de **10 m²** de área útil por pessoa.

Mais específico aos ganhos internos de calor, o CIBSE (2019) apresenta uma tabela com recomendações a serem seguidas para densidades de ocupações distintas em escritórios, fornecendo valores em W/m² para pessoas, Iluminação e equipamentos eletrônicos (Tabela 3).

Tabela 3. Valores de referência para ganhos internos de calor em escritórios.

Fonte: CIBSE (2019).

Building type	Use	Density of occupation / m ² per person	Sensible heat gain / W·m ⁻²			Latent heat gain / W·m ⁻²	
			People	Lighting	Equipment	People	Other
Office	General	4	20	12	25	15	—
		8	10	12	20	7.5	—
		12	6.7	12	15	5	—
		16	5	12	12	4	—
		20	4	12	10	3	—

A tabela, entretanto, não apresenta os valores para a densidade de ocupação específica de **10 m²** por pessoa (escolhida para as simulações desta tese). Sendo assim, foi realizada uma média entre os valores apresentados na tabela para as ocupações de 8 e 12 m² por pessoa. Como resultado (da média para os valores recomendados de 8 e 12 m²), foram obtidos os seguintes valores de calor sensível e latente:

- Pessoas: **8,35 W/m²** (calor sensível) e **6,25 W/m²** (calor latente);
- Iluminação: **12 W/m²** (na tabela este valor não se altera com a densidade de ocupação);
- Equipamentos eletrônicos: **17,5 W/m²** (calor sensível).

Com relação à iluminação artificial é possível considerar um valor menor que os 12 W/m² apresentados na tabela pois o próprio CIBSE (2019) menciona que este valor é para lâmpadas fluorescentes, e caso seja utilizado LED, o valor pode ser 50% menor. Como atualmente o mercado de escritórios em sua grande maioria está adotando como padrão a utilização de luminárias LED, pode-se considerar o valor de 6 W/m². Adicionalmente, segundo Marcondes et al. (2018), mesmo com a presença de sombreamento externo nas fachadas, é possível obter iluminação natural adequada nos escritórios* (entre 300 e 3.000 lux por 75% das horas de ocupação) em aproximadamente 35% da área útil de planta. Considerando a utilização de um sistema de automação que dimerize as lâmpadas nos momentos em que a luz natural for suficiente, pode-se considerar que o valor real será de 3,9 W/m² para 75% das horas de ocupação anual e de 6 W/m² para 25% das horas remanescentes, em que os níveis de iluminância provenientes da luz natural não sejam suficientes. Sendo assim, como as simulações térmicas adotam um valor médio anual, será adotado o valor de **4,42 W/m²** (sendo a média proporcional entre os dois valores).

5.3 CENÁRIOS ALTERNATIVOS

Um conjunto de cenários alternativos de modelos do caso-base (de planta quadrada e planta retangular) foi elaborado a partir de variações de características arquitetônicas do projeto, visando ao incremento do movimento de ar nos ambientes de trabalho e, conseqüentemente, a melhorias no desempenho térmico do modelo, ao longo de um ano típico. Tais variações arquitetônicas foram, por sua vez, baseadas em princípios da física aplicada, vistas nas lições aprendidas com o estudo de precedentes e na pesquisa de campo e incluíram a inserção de elementos de sombreamento externo e vazios do tipo átrio de diferentes tamanhos e em diferentes localizações na planta.

* O modelo representativo simulado por Marcondes et al. (2018) teve como base o levantamento realizado por Pereira (2017) e apresenta dimensões de planta similares ao caso-base proposto nesta tese.

A primeira etapa das variações consistiu em proporcionar sombreamento para todas as fachadas (nas diferentes orientações), tendo como diretriz os estudos apresentados no capítulo 4, em que a radiação solar direta é bloqueada a partir das 9h, permitindo apenas a passagem de luz natural difusa³.

Subsequentemente, outras intervenções foram propostas com ênfase na criação de vazios (átrios), localizados em diferentes posições nas plantas e com diferentes dimensões, permitindo que o fluxo de ar pudesse ser ampliado por efeito chaminé. Os átrios que compõem os diversos cenários simulados podem ser divididos em dois grupos de acordo com a altura: átrios com 12 pavimentos e átrios com 6 pavimentos (seguindo a referência dos estudos de caso dos edifícios Commerzbank Bank e 30th St. Mary Axe, com “vilas” de 12 e 6 pavimentos, respectivamente).

Em relação à posição dos átrios na planta, é possível dividir os cenários em três grupos, sendo os dois primeiros grupos mais pertinentes a uma abordagem projetual de *retrofit* (requalificação) de edificações existentes e o terceiro grupo em um cenário propositivo que só é viável no caso de novos edifícios, pois incorre no deslocamento do núcleo central:

³ Nas Figuras 83,84,85,86,87 e 88 os dispositivos de sombreamento foram retirados para fornecer uma melhor visualização da interação entre o layout interno e os átrios/janelas externas.

- **Grupo 1: átrios periféricos**

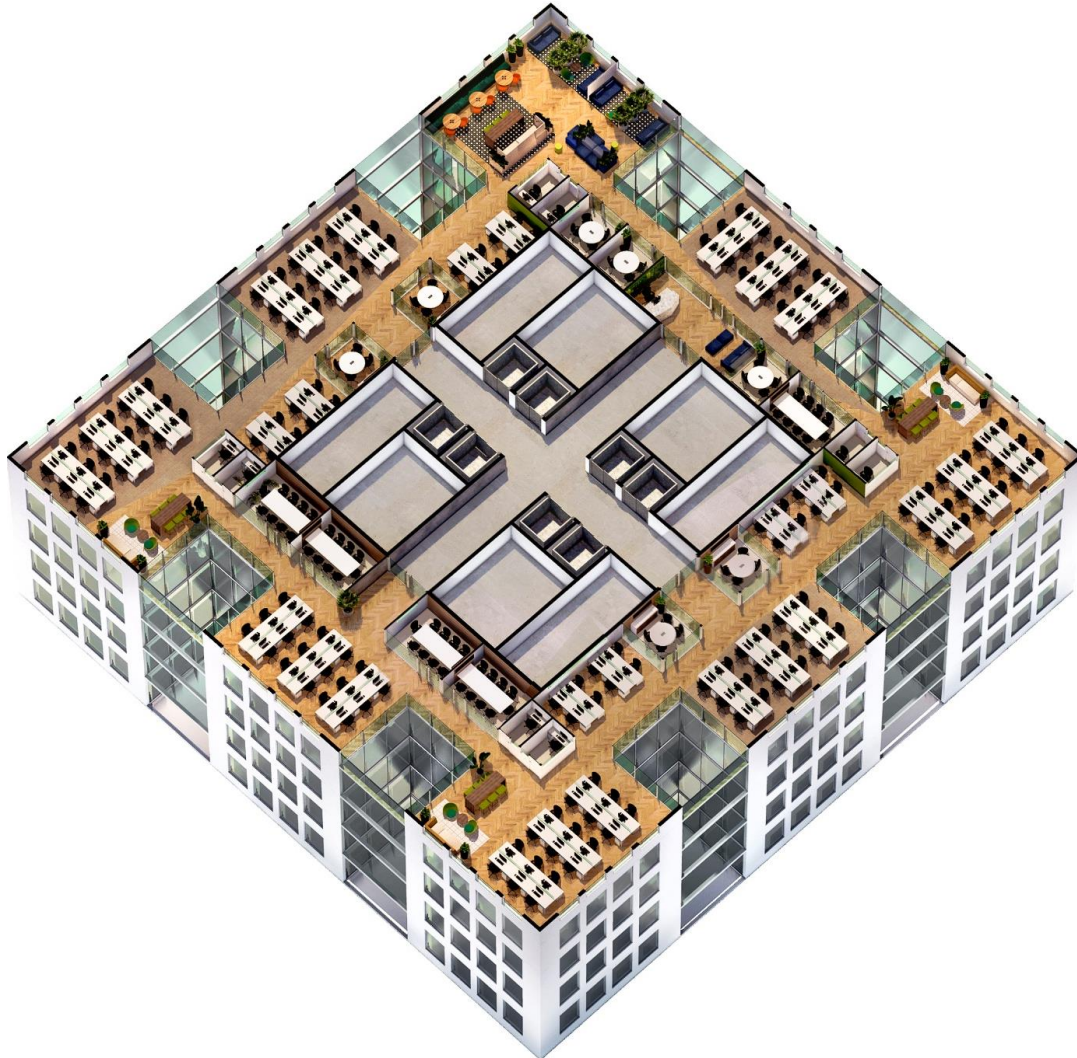


Figura 83. Edifício de planta quadrada com átrios periféricos.

Fonte: autor da tese.

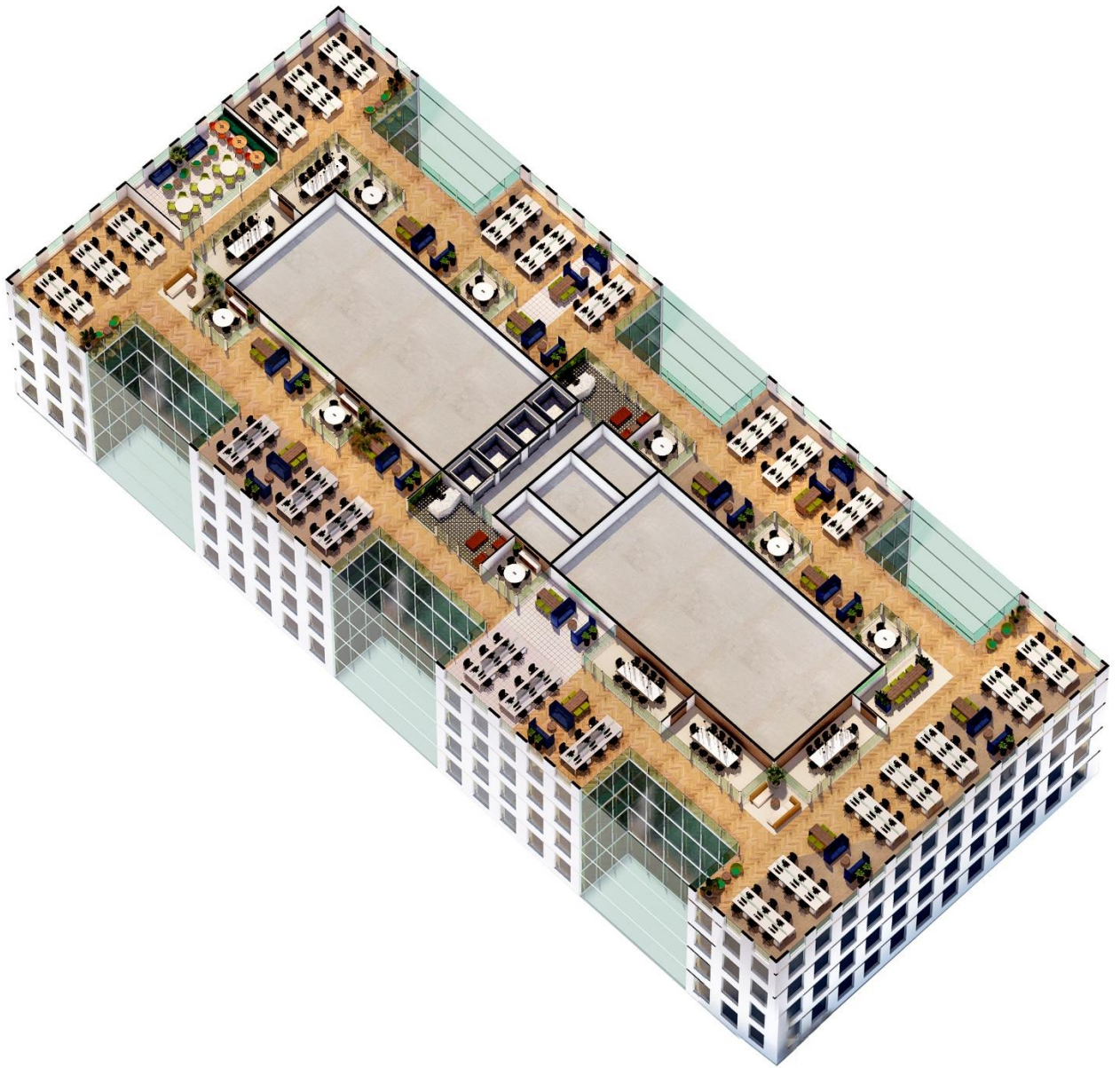


Figura 84. Edifício de planta retangular com átrios periféricos.

Fonte: autor da tese.

- **Grupo 2: átrios adjacentes ao núcleo**

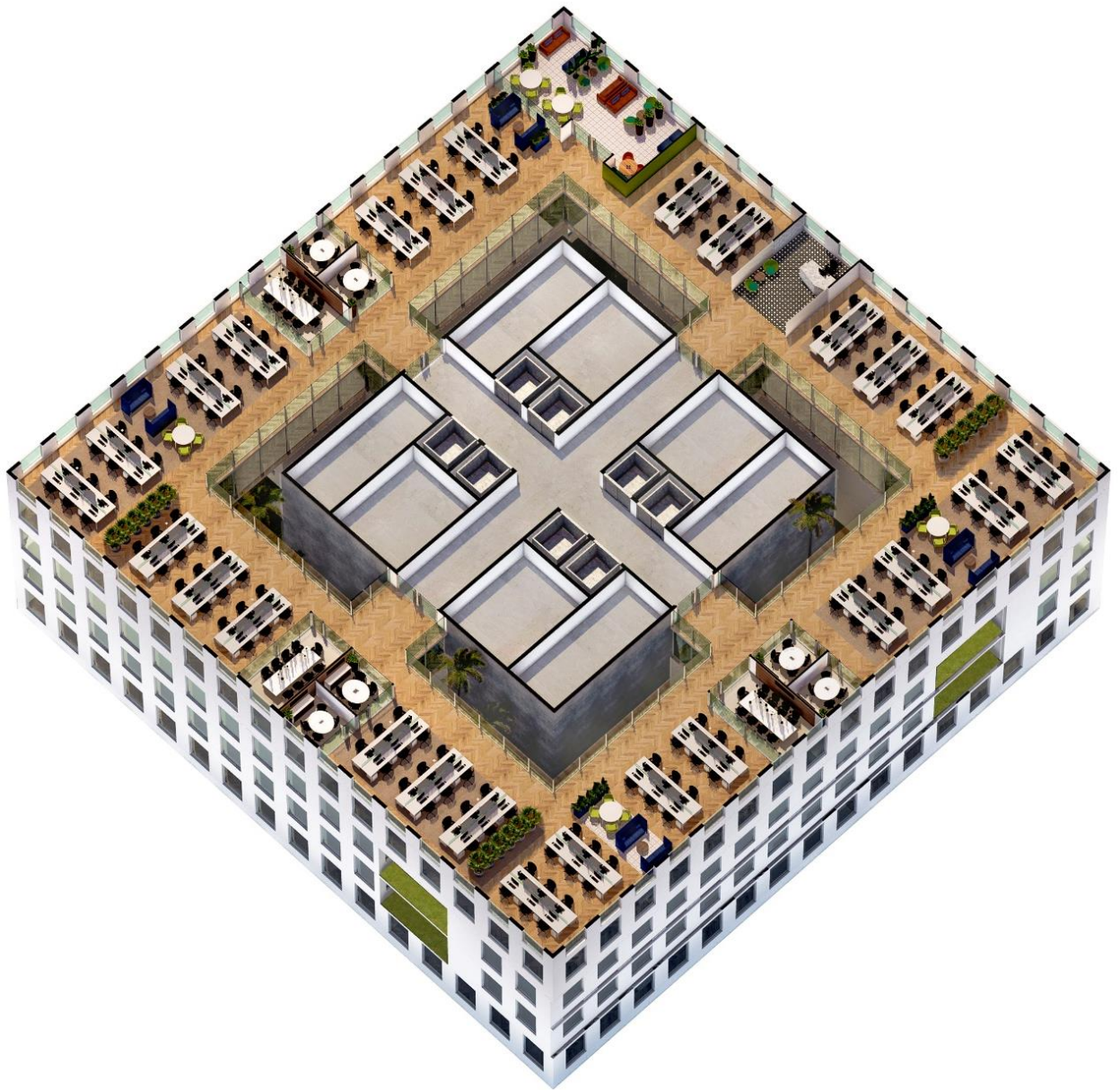


Figura 85. Edifício de planta quadrada com átrios adjacentes ao núcleo.
Fonte: autor da tese.

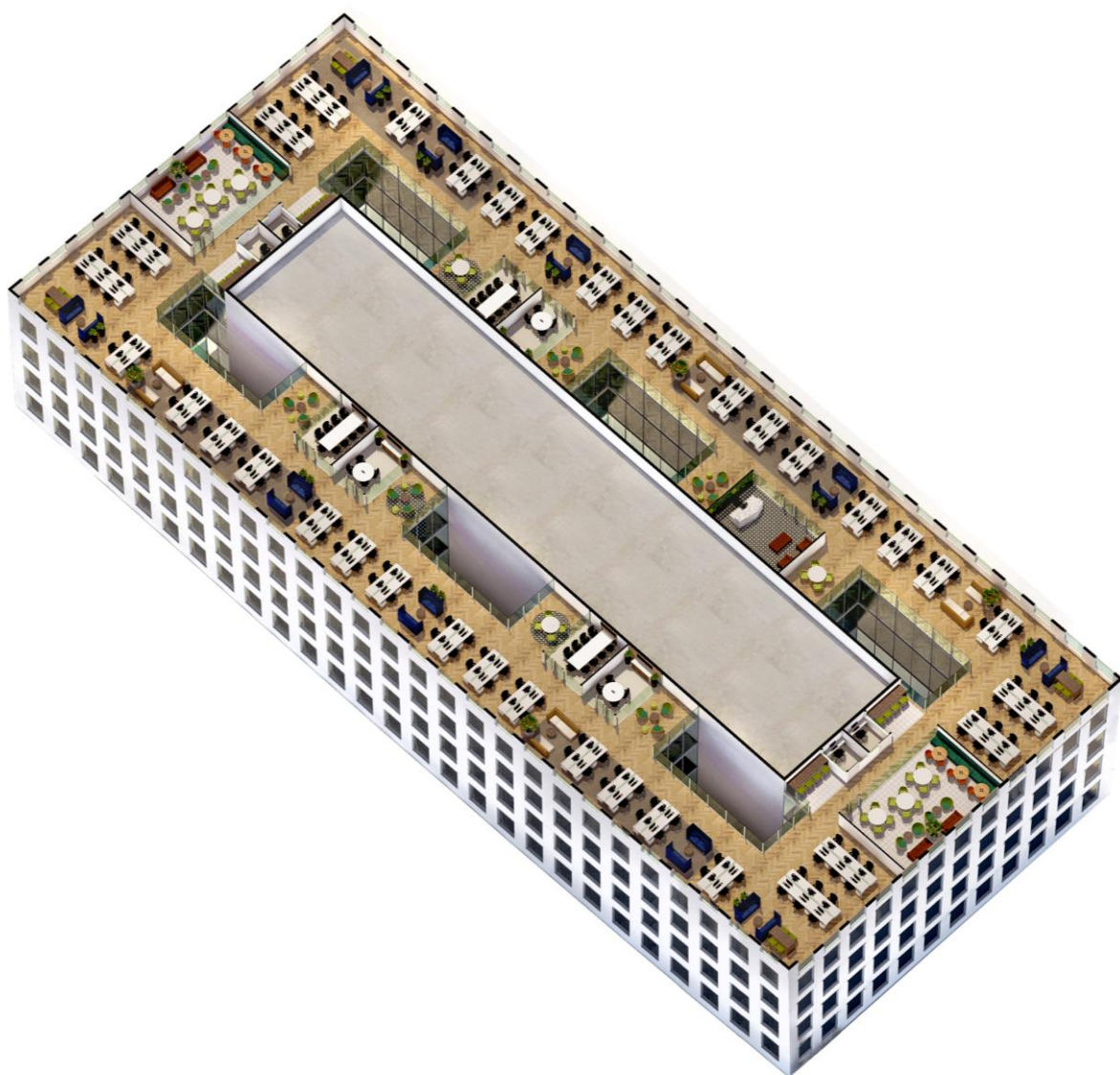


Figura 86. Edifício de planta retangular com átrios adjacentes ao núcleo.
Fonte: autor da tese.

- **Grupo 3: átrios centrais**

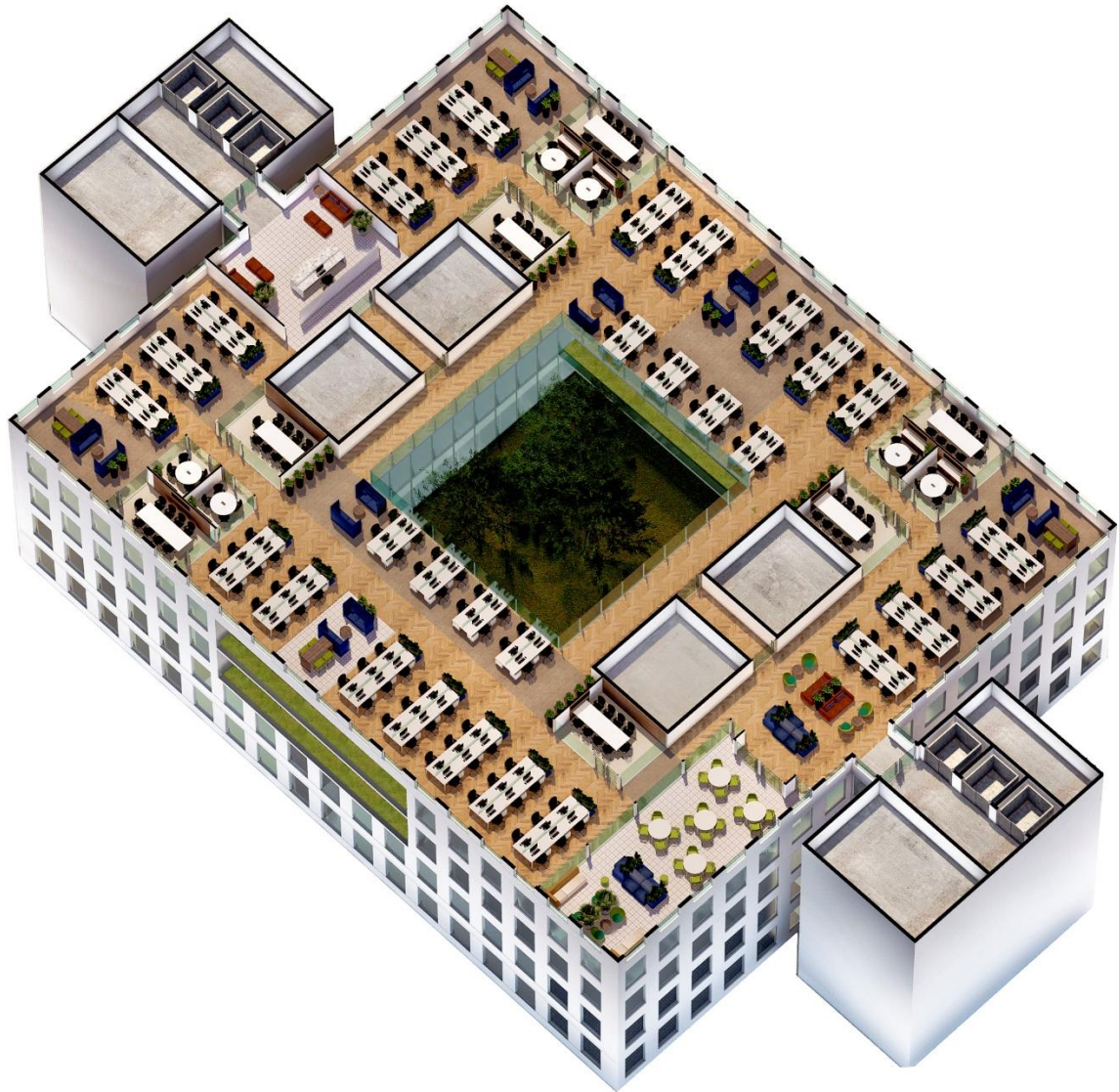


Figura 87. Edifício de planta quadrada com átrios centrais.

Fonte: autor da tese.

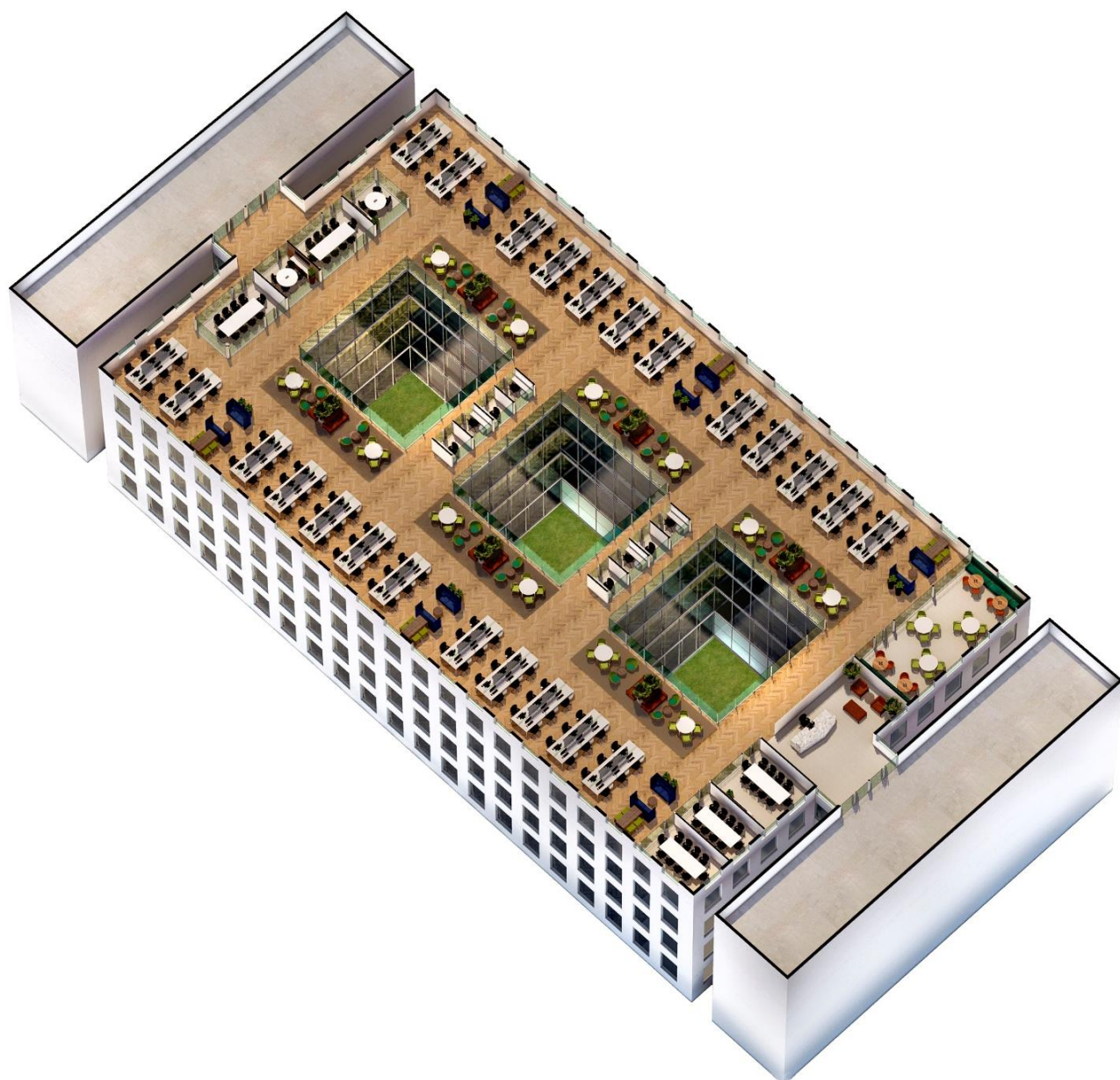


Figura 88. Edifício de planta retangular com átrios centrais.

Fonte: autor da tese.

5.3.1 Layout

Foram realizados estudos de layout para as três tipologias de vazios nas plantas. Em todas elas, adotou-se como premissa privilegiar as áreas próximas das janelas para localização das estações de trabalho, considerando que tais áreas são as de maior permanência e que demandam níveis maiores de iluminação. Sendo assim, com o benefício de melhores vistas externas e acesso a luz natural por maior

período de tempo, a área perimetral da planta pode proporcionar maior nível de satisfação aos usuários. Vale lembrar que, sempre que possível, as estações de trabalho foram posicionadas de forma perpendicular à fachada de modo a reduzir o ofuscamento e o reflexo nas telas de computador (conforme recomendação do CIBSE, 1999). As áreas colaborativas e salas de reunião foram distribuídas nas plantas em um critério mais flexível (até porque não são áreas de longa permanência), podendo estar junto ao núcleo de serviço, junto à fachada ou até interrompendo o ritmo das estações de trabalho.

Outra tendência verificada na atuação profissional do autor desta tese é que as salas fechadas (para diretores, gerentes, etc.) estão sendo cada vez menos requisitadas pelas empresas, tendo em alguns casos sido completamente excluídas do escopo do projeto (PURATOS, 2018; NEOENERGIA, 2019). Este direcionamento projetual está relacionado às tendências de nova economia (ver “Colocação do problema”), pela qual as empresas têm uma relação hierárquica mais horizontal entre os colaboradores.

É importante ressaltar que o aspecto mais importante deste estudo de layout, para distintas tipologias de vazios e formatos de planta, é confirmar que os átrios não são um empecilho para viabilizar a implementação de um layout mais contemporâneo de escritório. Pelo contrário, no caso do vazio perimetral, verifica-se uma contribuição para quebrar a repetição massiva das estações de trabalho, que pode ser benéfica para a acústica dos ambientes. Já no caso do vazio próximo do núcleo, ele contribui para reduzir a profundidade de área útil de planta, permitindo que a área de iluminação passiva seja proporcionalmente maior (na área útil de ocupação). Ademais, os átrios contribuem para criar vistas internas interessantes que enriquecem a experiência do usuário.

5.3.2 Cenários de análise para o caso-base de planta quadrada

A partir do edifício representativo de planta quadrada (caso-base 1), um total de 18 cenários foram gerados (Figura 89) considerando três tamanhos de átrio, sendo que o maior deles utiliza como referência o edifício 30th Saint Mary Axe, adotando a mesma proporção de vazios em relação à área útil de planta (16% de vazios e 84%

de área útil). É importante ressaltar que esta proporção foi considerada a maior entre os demais cenários, porque entende-se que em um contexto de *retrofit* é interessante agregar melhorias arquitetônicas que aumentem o desempenho ambiental da edificação, preservando ao máximo a área útil de planta (pois a metragem quadrada de planta impacta diretamente no valor do imóvel). Desse modo, a proporção de vazios com 16% da área útil foi o ponto de partida para as análises, adotando proporções menores para os demais cenários (8% e 4%). Adicionalmente, conforme avaliado por Caputo (2019), os átrios do edifício 30th Saint Mary Axe exercem uma função tão significativa para iluminação natural da planta como para ventilação, o que significa que, adotando proporções menores para os outros cenários, é possível avaliar qual a dimensão mínima de vazio para um desempenho satisfatório de ventilação natural.

Dessa forma, foram avaliados átrios de três tamanhos distintos (16%, 8% e 4% da área útil de planta) para os três grupos de posições de átrio (periférico, adjacente ao núcleo e central), conforme demonstrado na figura 89. Cada um desses cenários foi avaliado com 6 e 12 pavimentos.

Átrio Pequeno

área útil 96%
vazios 4%

Átrio Médio

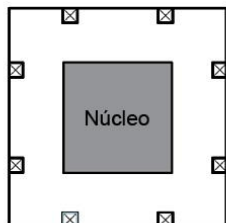
área útil 92%
vazios 8%

Átrio Grande

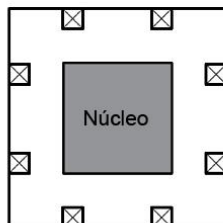
área útil 84%
vazios 16%

1.

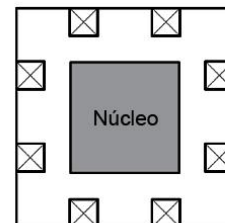
Pavimentos de
entrada e saída de ar
e pav. intermediários



Pavimentos de
entrada e saída de ar
e pav. intermediários

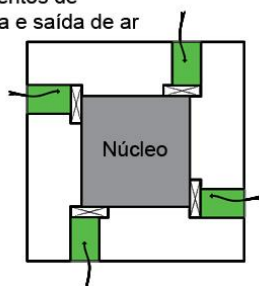


Pavimentos de
entrada e saída de ar
e pav. intermediários

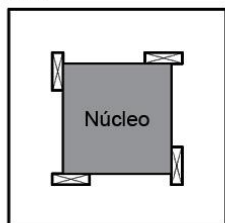


2.

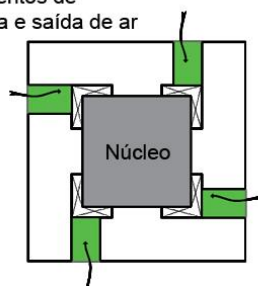
Pavimentos de
entrada e saída de ar



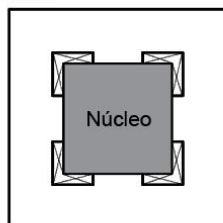
Pavimentos
intermediários



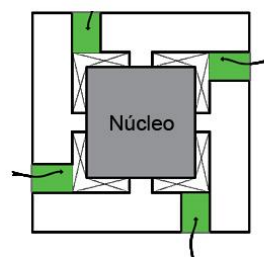
Pavimentos de
entrada e saída de ar



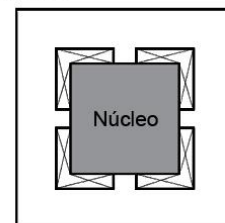
Pavimentos
intermediários



Pavimentos de
entrada e saída de ar

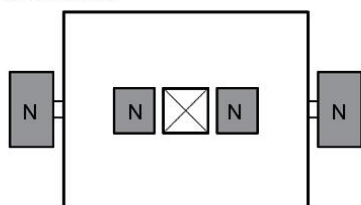


Pavimentos
intermediários

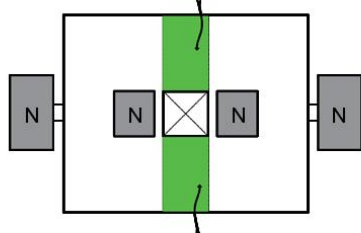


3.

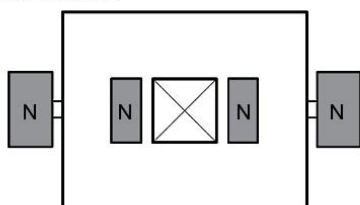
Pavimentos
intermediários



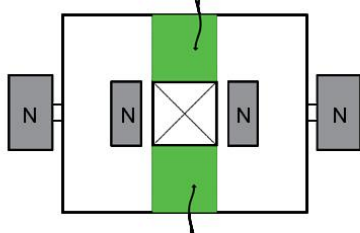
Pavimentos de
entrada e saída de ar



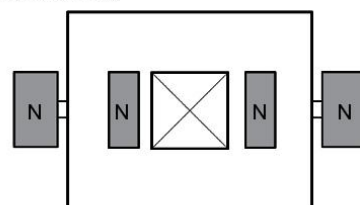
Pavimentos
intermediários



Pavimentos de
entrada e saída de ar



Pavimentos
intermediários



Pavimentos de
entrada e saída de ar

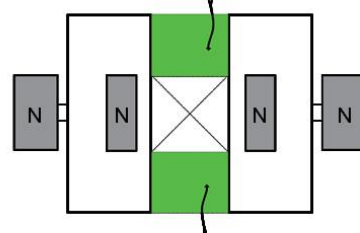


Figura 89. Cenários de análise para o caso-base de planta quadrada. As tipologias de átrios aplicadas nos cenários seguem as numerações: 1. Cenários com átrios periféricos. 2. Cenários com átrios adjacentes ao núcleo. 3. Cenários com átrios centrais. Nos pavimentos de entrada e saída de ar (pavimentos mais baixos e mais altos respectivamente), foram criados jardins e varandas permitindo que o ar externo chegue até os vazios, que nos casos dos átrios adjacentes ao núcleo e átrios centrais, se encontram no interior da planta.

Fonte: Autor da tese.

5.3.3 Cenários de análise para o caso-base de planta retangular

Os mesmos 18 cenários gerados a partir do edifício representativo de planta quadrada, foram replicados para a planta de formato retangular (caso-base 2), como pode ser visto na Figura 90, perfazendo um total de 36 cenários simulados.

Átrio Pequeno

área útil 96%
vazios 4%

Átrio Médio

área útil 92%
vazios 8%

Átrio Grande

área útil 84%
vazios 16%

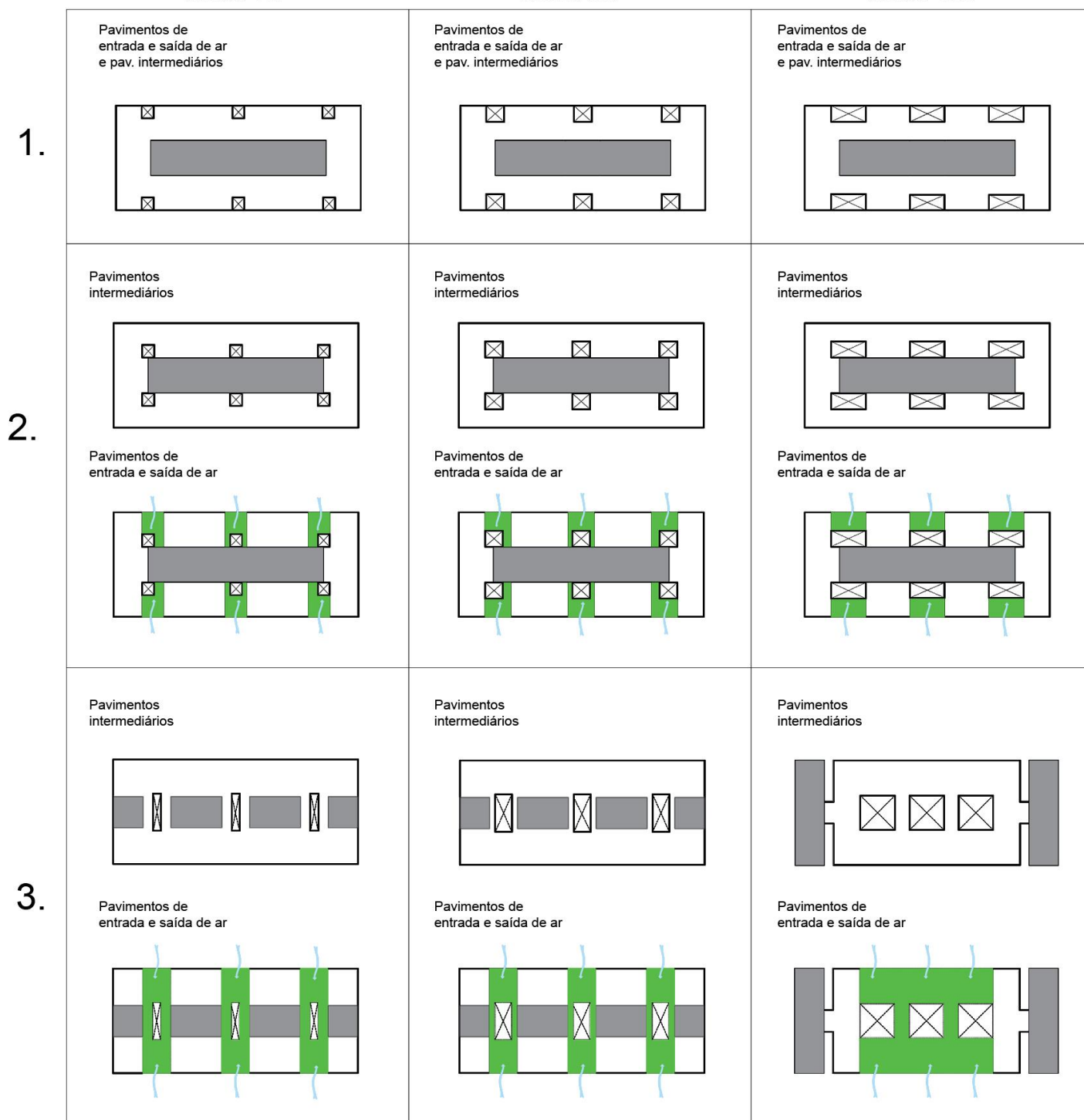


Figura 90. Cenários de análise para o caso-base de planta quadrada. As tipologias de átrios aplicadas nos cenários seguem as numerações: 1. Cenários com átrios periféricos. 2. Cenários com átrios adjacentes ao núcleo. 3. Cenários com átrios centrais. Nos pavimentos de entrada e saída de ar (pavimentos mais baixos e mais altos respectivamente), foram criados jardins e varandas permitindo que o ar externo chegue até os vazios, que nos casos dos átrios adjacentes ao núcleo e átrios centrais, se encontram no interior da planta.

Fonte: Autor da tese.

5.4 ETAPAS DAS SIMULAÇÕES DE TERMODINÂMICA

O software TAS Engineering (EDSL, 2019) versão 9.4.4 foi utilizado para as simulações computacionais por ter o potencial de fornecer dados de desempenho térmico e ventilação (em trocas de ar por hora) dos ambientes. O trabalho das simulações pode ser dividido nas seguintes etapas:

- Construção dos modelos 3D;
- Seleção de arquivo com dados climáticos;
- Inserção dos parâmetros de ocupação, operação e materiais de construção;
- Elaboração de relatórios com os resultados.

5.4.1 Construção dos modelos 3D

Os modelos 3D foram gerados utilizando a função 3d Modeller do TAS e foram desenvolvidos em conformidade com os parâmetros detalhados no item 5.1 (Caso-base). Diferentemente de outras pesquisas anteriores (focadas em térmica e iluminação), que simularam apenas um pavimento tipo, a presente pesquisa teve de simular em cada cenário no mínimo 6 ou 12 pavimentos, pois só assim foi possível verificar a influência dos vazios na térmica de todos os andares conectados aos átrios.

Após modelar a geometria do edifício, as zonas de análise foram aplicadas às plantas, definindo quais áreas do edifício seriam verificadas pelo software. Nos edifícios representativos de 36 pavimentos, as zonas foram aplicadas a 14 pavimentos (no caso de átrios com 12 pavimentos) e 8 pavimentos (para os átrios de 6 pavimentos). Em todos os casos, adotou-se o critério de aplicar zonas a um pavimento acima do pavimento mais alto do *cluster* e também a um pavimento abaixo do pavimento de entrada de ar (inferior), para que seja considerada a influência térmica dos andares adjacentes.

Em cada pavimento foi aplicada uma única zona para toda a área útil da planta e uma outra zona para o núcleo de serviços. Os átrios receberam uma única zona para todos os pavimentos, de modo a simplificar a análise.

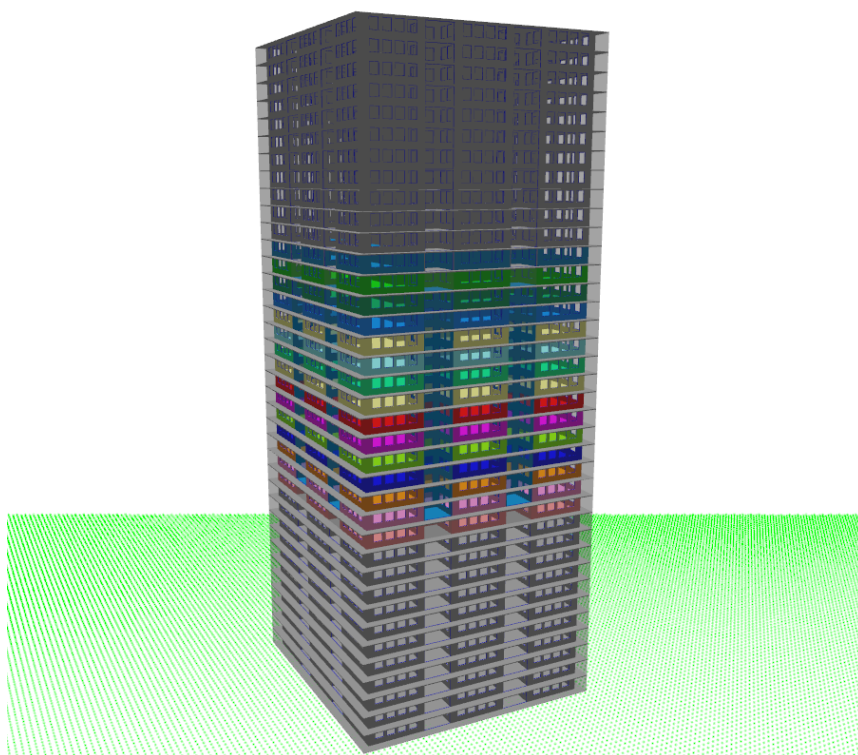


Figura 91. Modelo extraído do software TAS. Pavimentos coloridos indicam as áreas que receberam aplicação de zonas.

Fonte: EDSL (2019).

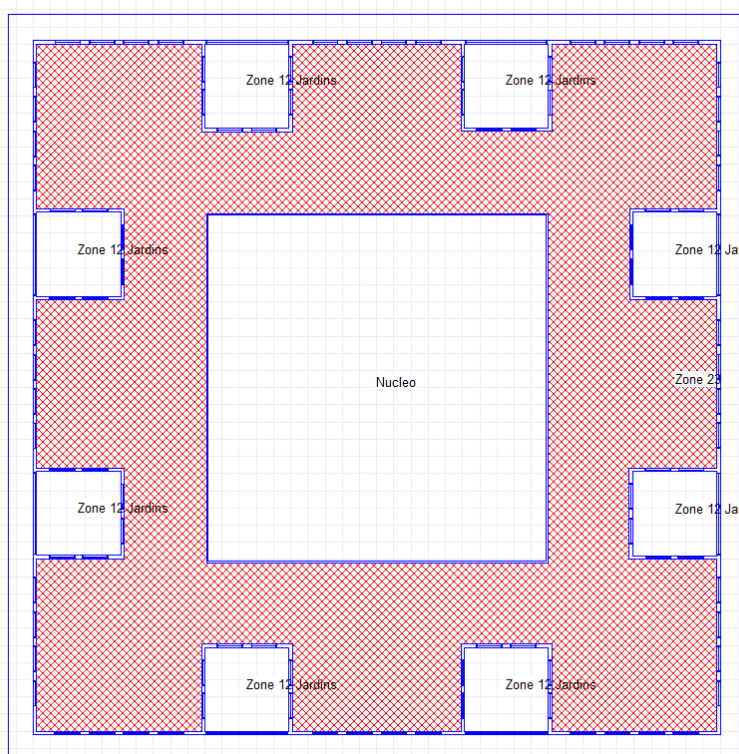


Figura 92. Planta demonstrando os limites da zona térmica dos escritórios.

Fonte: EDSL (2019).

Em todos os cenários, os átrios são fechados por paredes nas faces internas voltadas para os escritórios e, no caso do átrio periférico, ele possui também fechamento de cortina de vidro na face externa permitindo entrada de luz natural. Os átrios são abertos para a área externa somente no pavimento mais inferior e no pavimento mais alto do grupo (Figura 93), configurando assim as entradas e saídas de ar. Nos cenários de átrio adjacente ao núcleo e átrio central, esses pavimentos de entrada e saída de ar têm uma configuração diferente de planta, formando áreas maiores de varanda e permitindo maior permeabilidade no fluxo de ar, conforme pode ser visto nas figuras 94 e 95.

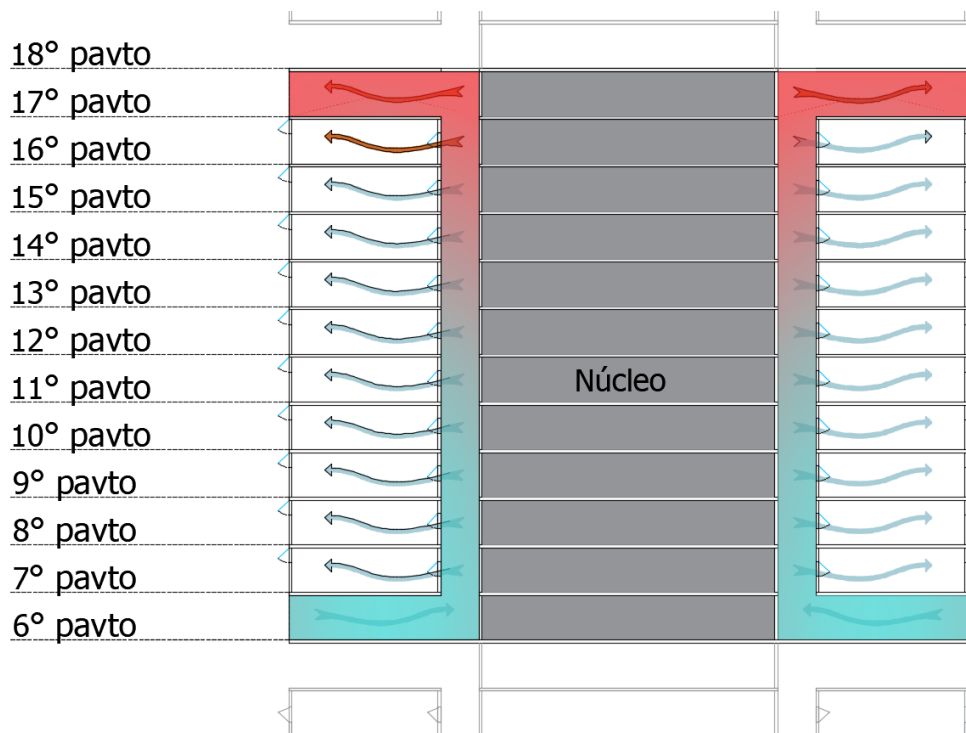


Figura 93. Corte do caso-base com átrio de 12 pavimentos adjacente ao núcleo.

Fonte: Autor da tese.

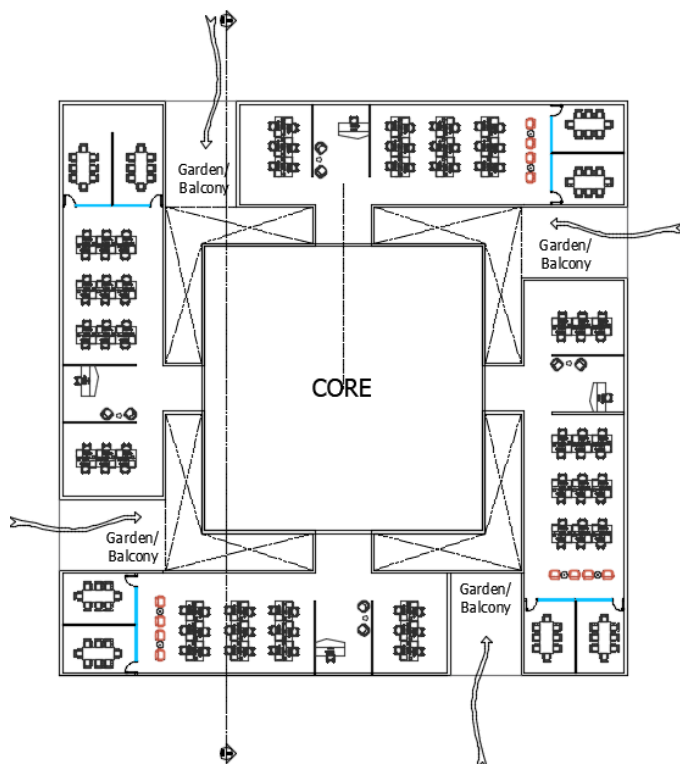


Figura 94. Planta dos pavimentos de entrada e saída de ar no cenário com átrio adjacente ao núcleo.
Fonte: Autor da tese.

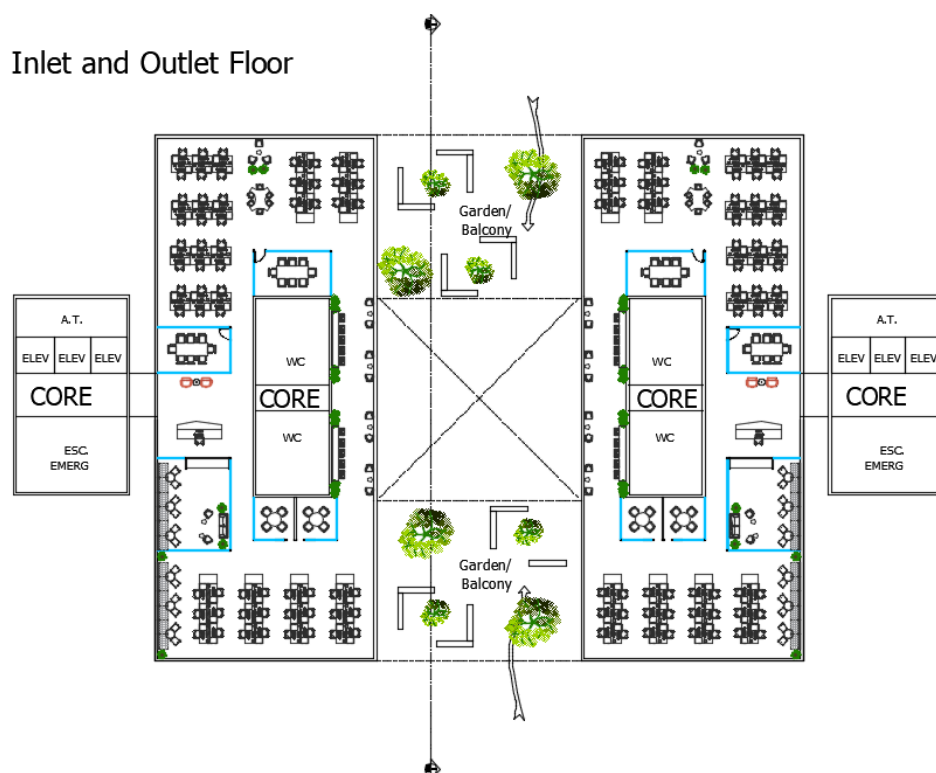


Figura 95. Planta dos pavimentos de entrada e saída de ar no cenário propositivo de átrio central.
Fonte: Autor da tese.

Os modelos representativos contam com janelas externas com peitoril de 0,8 m de altura e dimensões: 1,5 m (L) x 2,00 m (H). Essas mesmas janelas são também posicionadas dentro dos átrios de forma a permitir o fluxo de ar controlado entre os átrios e os espaços de trabalho (Figura 92).

Os dispositivos de proteção solar das fachadas não foram aplicados na ferramenta 3d Modeller, sendo posteriormente inseridos na ferramenta TAS Building Simulator.

5.4.2 Dados de entrada

Os dados climáticos utilizados nas simulações foram extraídos do banco de dados do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2018), baseados nas medições realizadas em um período de 15 anos (entre 2003 e 2017). Esses dados foram inseridos no software TAS no formato EPW. Adicionalmente o TAS Building Simulator também requer a inserção de dados específicos da edificação e da operação do edifício, que são posteriormente processados nas simulações. Tais dados serão detalhados nos próximos itens.

5.4.2.1 *Materiais construtivos*

Os materiais construtivos aplicados nas simulações foram:

- **Janelas:** vidro laminado incolor 10 mm (U Value 5,56 W/m² °C) e caixilhos de alumínio (U Value 4,1 W/m² °C);
- **Paredes externas:** revestimento externo de ACM, isolamento térmico com lã de vidro 70 mm e acabamento interno com placa de gesso (U Value 0,48 W/m² °C);
- **Paredes do núcleo:** paredes de concreto com espessura de 150 mm (U Value 2,91 W/m² °C);
- **Laje:** laje de concreto aparente sem forro, com espessura de 150 mm (U Value 2,91 W/m² °C);
- **Piso:** piso elevado metálico com acabamento em carpete.

5.4.2.2 Cargas térmicas

As cargas térmicas utilizadas nas simulações estão em conformidade com os parâmetros descritos no item 5.2 e foram aplicadas considerando um cronograma (schedule) de operação das 9h às 19h (excluindo fins de semana).

5.4.3 Sombreamento

Cada fachada da edificação recebeu um tipo de proteção solar de acordo com a orientação, em conformidade com as recomendações dos estudos analíticos realizados por Cotta (2012) demonstradas no capítulo 4. Os dispositivos de proteção solar foram inseridos nas simulações utilizando a ferramenta *Feature Shades*. Nessa ferramenta é necessário inserir dados de dimensões das proteções solares horizontais e dos elementos verticais de sombreamento.

É importante ressaltar que a ferramenta *Feature Shades* só permite inserir uma única dimensão para proteção solar horizontal ou vertical. Então, nos casos em que houver mais de uma proteção horizontal ou vertical para a mesma janela, as dimensões da proteção solar devem ser somadas. Entretanto, isso não altera a capacidade de sombreamento da proteção solar. Por exemplo, uma janela que utiliza como proteção solar dois beirais de 0,50 m de comprimento (um acima da janela e outro posicionado no meio do vão) terá um nível similar de obstrução da radiação direta quando comparada à mesma janela com um único beiral de 1 metro de comprimento instalado logo acima da janela.

Assim, levando em consideração que cada um dos arquivos gerados (*Feature Shades*) se aplica a uma única tipologia de caixilho, foram criados quatro tipos de janelas (para as orientações N, S, L, O) e cada um recebeu um tipo de sombreamento:

- **Caixilhos localizados na fachada norte:**

Proteção solar horizontal do tipo beiral com dimensões: 2,00 m (comprimento) x 1,5 m (largura).

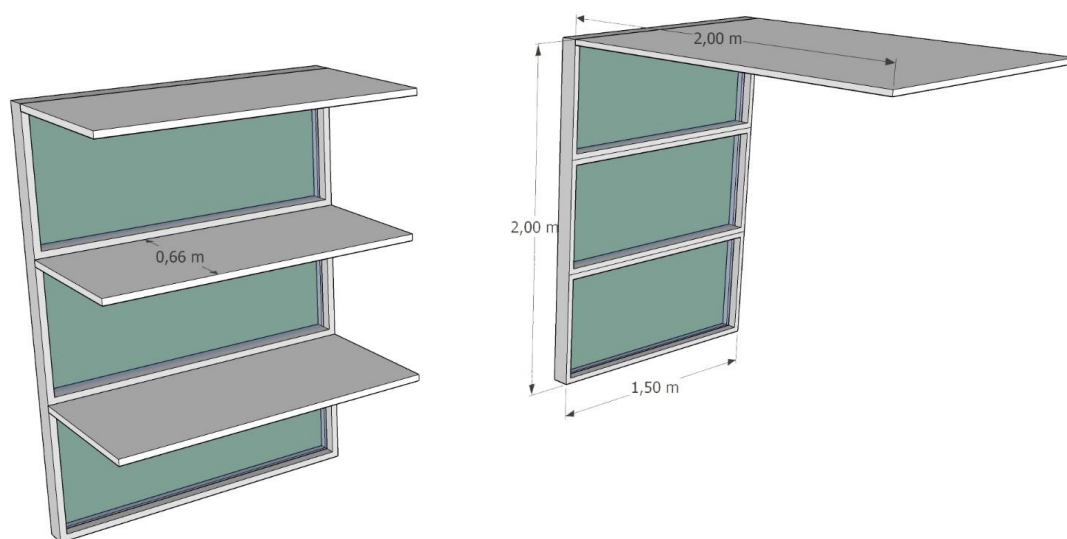


Figura 96. Perspectiva da proteção solar horizontal aplicada na fachada norte. Na janela à direita a proteção solar tem as mesmas dimensões inseridas na ferramenta *Feature Shades* e à esquerda uma proposta arquitetônica de dividir a proteção em três beirais, que mantêm a mesma projeção de sombreamento.

Fonte: Autor da tese.

- **Caixilhos localizados na fachada sul:**

Proteção solar vertical com dimensões: 2,00 m (altura) x 0,7 m (largura), instalada em ambos os lados da janela.

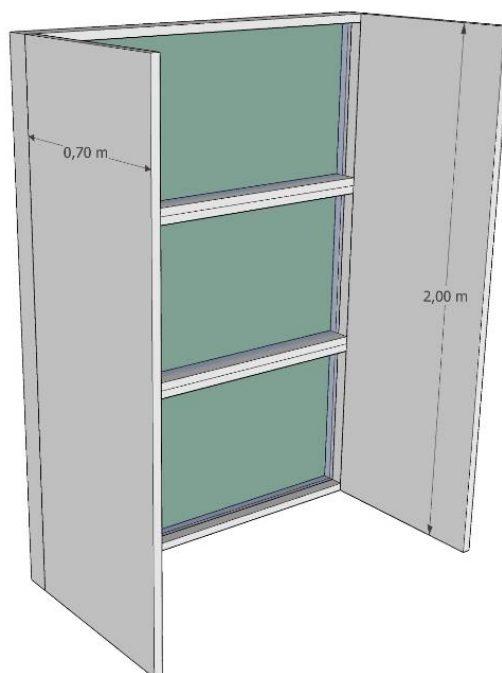


Figura 97. Perspectiva da proteção solar vertical aplicada na fachada sul com as mesmas dimensões aplicadas na ferramenta *Feature Shades*.

Fonte: Autor da tese.

- **Caixilhos localizados na fachada leste:**

Proteção solar horizontal do tipo beiral com dimensões: 2,50 m (comprimento) x 1,5 m (largura).

Proteção solar vertical com dimensões: 2,00 m (altura) x 0,8 m (largura), instalada em ambos os lados da janela.

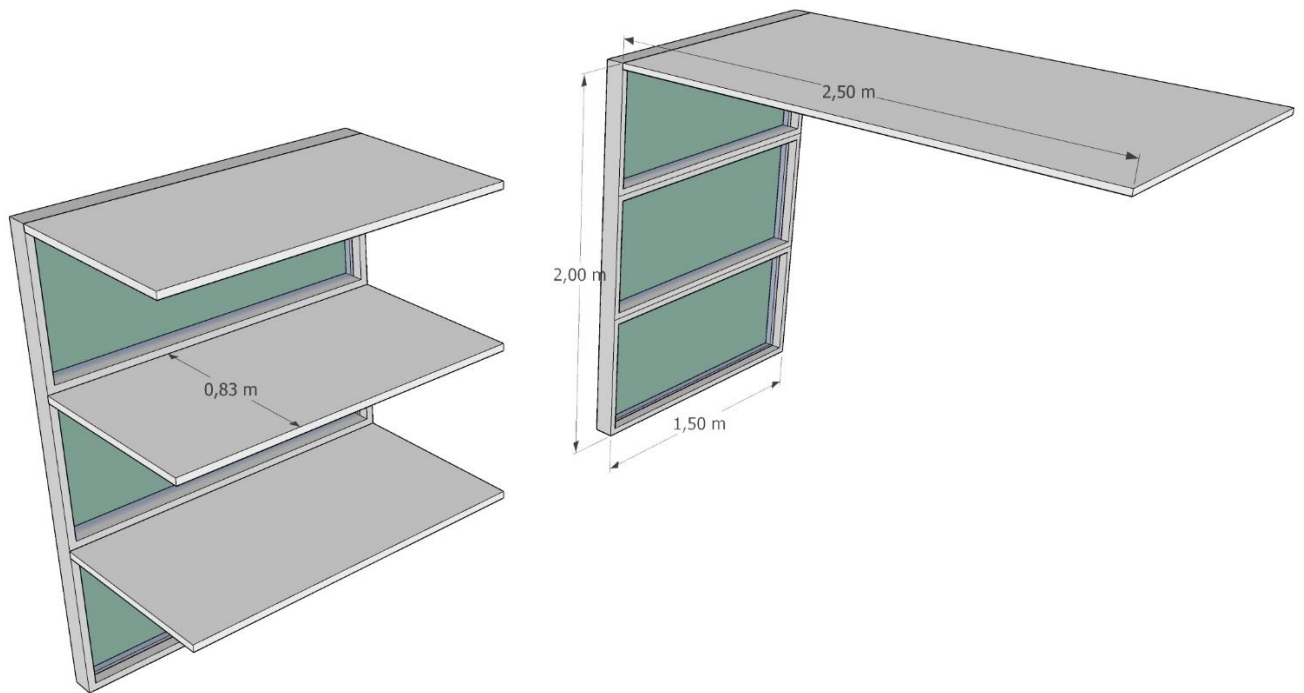


Figura 98. Perspectiva da proteção solar horizontal aplicada na fachada leste. Na janela à direita a proteção solar tem as mesmas dimensões inseridas na ferramenta *Feature Shades* e à esquerda uma proposta arquitetônica de dividir a proteção em três beirais, que mantêm a mesma projeção de sombreamento.

Fonte: Autor da tese.

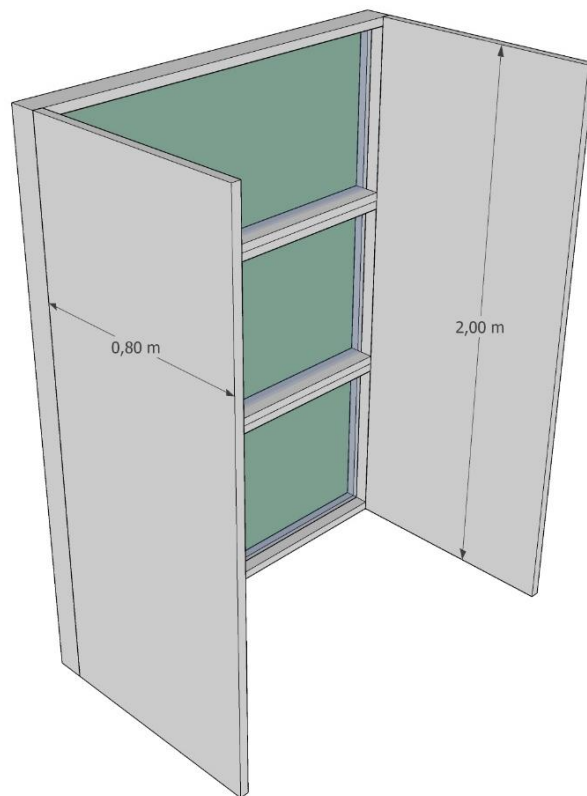


Figura 99. Perspectiva da proteção solar vertical aplicada na fachada leste com as mesmas dimensões aplicadas na ferramenta Feature Shades.

Fonte: Autor da tese.

- **Caixilhos localizados na fachada oeste:**

Proteção solar horizontal do tipo beiral com dimensões: 2,50 m (comprimento) x 1,5 m (largura).

Proteção solar vertical com dimensões: 2,00 m (altura) x 2,50 m (largura), instalada em ambos os lados da janela.

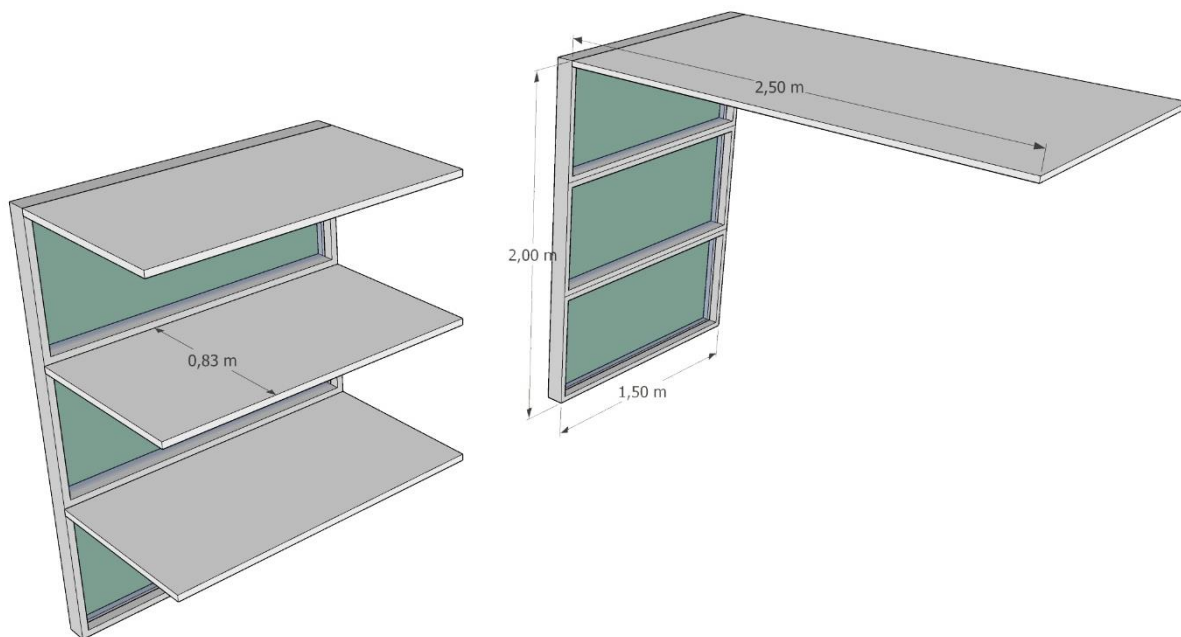


Figura 100. Perspectiva da proteção solar horizontal aplicada na fachada oeste. Na janela à direita a proteção solar tem as mesmas dimensões inseridas na ferramenta *Feature Shades* e à esquerda uma proposta arquitetônica de dividir a proteção em três beirais, que mantêm a mesma projeção de sombreamento.

Fonte: Autor da tese.

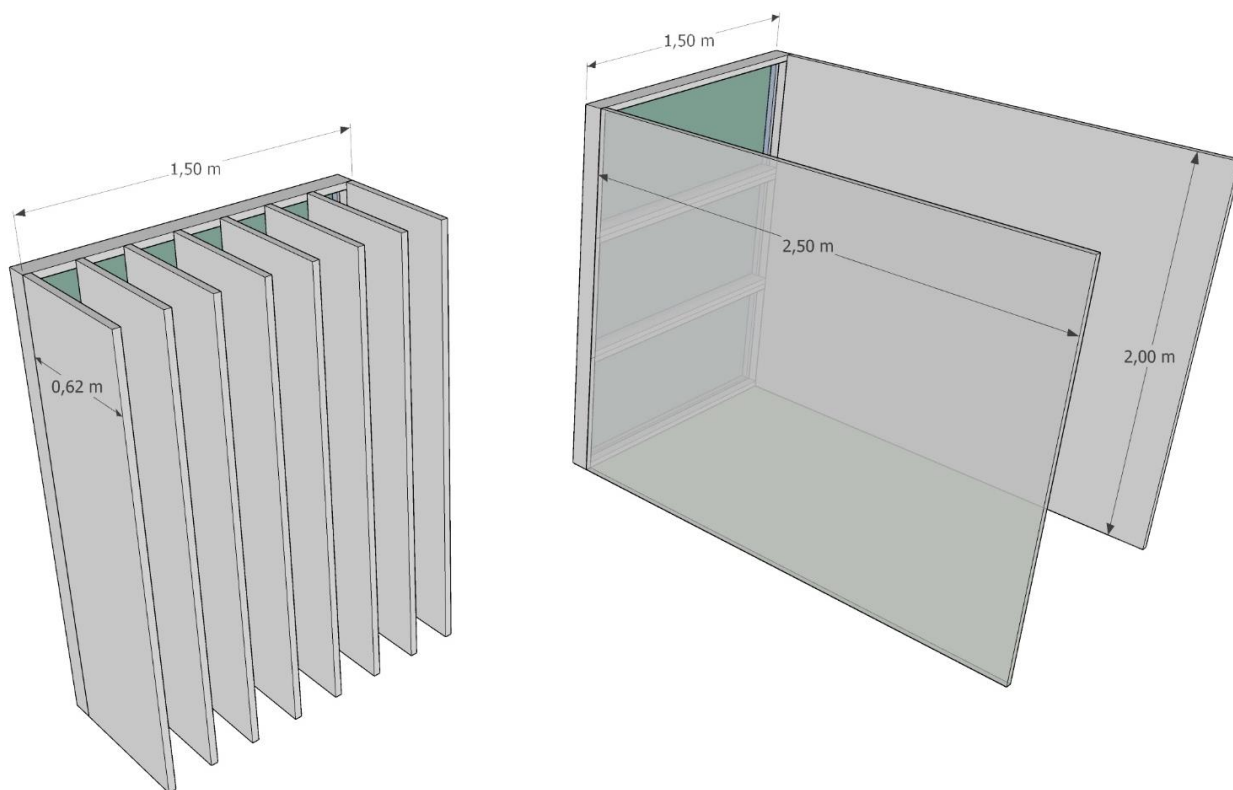


Figura 101. Perspectiva da proteção solar vertical aplicada na fachada oeste. Na janela à direita a proteção solar tem as mesmas dimensões inseridas na ferramenta *Feature Shades* e à esquerda uma proposta arquitetônica de dividir a proteção em oito brises, que mantêm a mesma projeção de sombreamento.

Fonte: Autor da tese.

5.4.4 Aberturas de janelas

As especificações de janelas para todos os cenários podem ser divididas em dois grupos: janelas que abrem diretamente para as áreas externas e as janelas que abrem internamente para os átrios. A tipologia Maxim-ar foi adotada para as aberturas externas por oferecer proteção à chuva e, conforme verificado por Cotta (2012) e Marcondes (2010), essa tipologia tem área efetiva de ventilação de 30% da área total do caixilho. Conforme observado na pesquisa de campo realizada na Prefeitura de Jundiaí (capítulo 4), é importante que as janelas contemplem várias alturas de abertura, para que, no período mais frio, ofereçam maior controle em relação ao fluxo de ar (nesse caso podendo abrir somente as janelas mais altas, para manter a salubridade do ambiente). Sendo assim, conforme pode ser visto nas figuras 102 e 103, foi adotado para as fachadas externas um projeto de janelas Maxim-ar com três alturas de abertura.

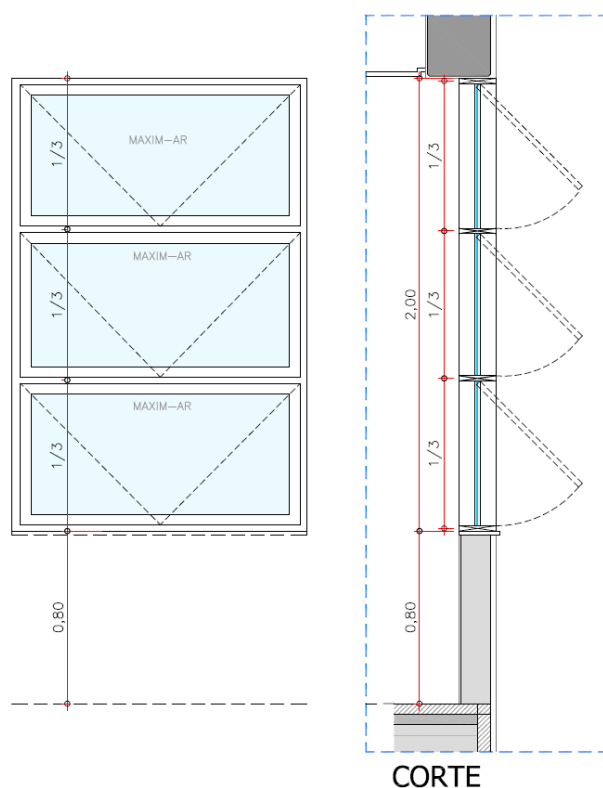


Figura 102. Elevação e corte demonstrando um projeto de janelas Maxim-ar com três alturas de abertura.

Fonte: Autor da tese.



Figura 103. Foto de uma fachada na qual foram aplicadas janelas Maxim-ar com três alturas de abertura.

Fonte: Autor da tese.

Desse modo, dentro da ferramenta *Apertures* no software TAS, essas janelas foram consideradas abertas no valor 0,3 durante as 24 horas do dia, possibilitando a ventilação noturna para resfriamento da edificação (nos meses em que há demanda de resfriamento). Adicionalmente, foram aplicadas as janelas pivotantes para as aberturas voltadas aos átrios, pois, em se tratando de um espaço interno, o critério de proteção contra a chuva não se faz necessário (Figura 104). Além disso a tipologia pivotante proporciona maior controle do fluxo de ar, o que é benéfico para evitar desconforto por velocidades de ar excessivas. Para essas janelas, foi aplicado o valor de abertura de 1,0 (100% de área efetiva de ventilação) durante as 24 horas do dia.

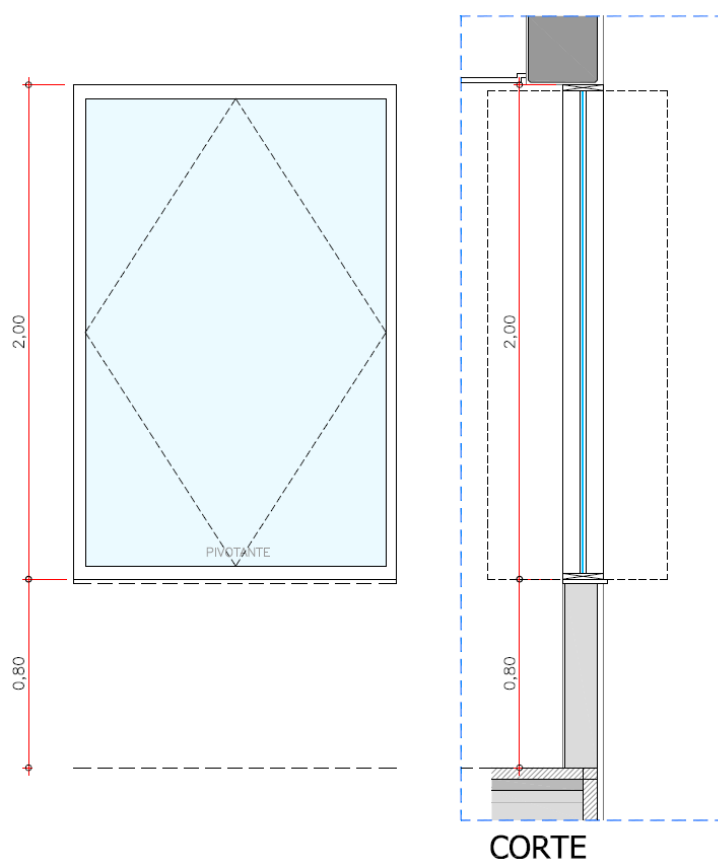


Figura 104. Elevação e corte demonstrando o projeto de uma janela pivotante vertical.
Fonte: Autor da tese.

Ademais, foi realizada uma comparação entre os cenários utilizando a função *Sheltered*, que quando aplicada serve para cortar o vento externo. Desse modo, em alguns cenários as janelas não tiveram esta função ativada, e portanto foi possível analisar a influência do vento no desempenho dos ambientes, todavia, em outros cenários, quando aplicada a função *Sheltered*, notaram-se variações na taxa de ventilação. Os resultados dessas simulações são apresentados no capítulo 6.

Outro aspecto importante referente à configuração das aberturas no software TAS (EDSL, 2019) está relacionado à operação em modo misto. Nesses casos, as janelas devem ser fechadas quando o sistema de ar-condicionado estiver operando. Para que isso ocorra, é necessário utilizar a ferramenta *Aperture Control Function*, e aplicar a configuração *Zone Control*, para que o fechamento das janelas esteja vinculado à temperatura de uma zona específica. Além disso, deve-se determinar em quais temperaturas as janelas irão abrir e fechar nos ambientes (utilizando os campos: *Lower Zone Temp*, *Upper Zone Temp* e *Cut-off Temp*). Como nesta tese as

simulações que consideram a operação em modo misto têm a finalidade de extrair as cargas de resfriamento que ocorrem nos períodos mais quentes, as janelas foram consideradas abertas com temperaturas acima de 10°C (essa temperatura só irá ocorrer no inverno, o que não impacta nesta série de simulações) e fechadas quando a temperatura da zona atingir 26°C e 28°C (limites estabelecidos de conforto, ver seção 5.5).

5.5 CRITÉRIOS DE ANÁLISES DE RESULTADOS

Os resultados das simulações termodinâmicas foram analisados com foco em três aspectos principais:

- Desempenho térmico dos ambientes de trabalho com ênfase no conforto dos usuários;
- Potencial de ventilação natural em cada um dos cenários;
- Consumo energético (cargas de resfriamento).

5.5.1 Desempenho térmico

O primeiro critério adotado para avaliação das simulações termodinâmicas teve como base o modelo de conforto adaptativo proposto pela regulamentação europeia EN 15251 que define Neutralidade Térmica (TN) como: $TN = 18.8 + 0.33T_{rm}$ (T_{rm} = média das temperaturas diárias). Adicionalmente, foi considerada uma variação térmica de + ou – 3°C aos valores de temperatura neutra, resultando em uma faixa de conforto de 6°C para 10% de insatisfeitos. Dessa forma, o algoritmo da EN 15251 foi aplicado aos dados climáticos de São Paulo para todas as 8.760 horas anuais e assim determinou-se qual a temperatura máxima aceitável para cada hora. Com isso, foi possível plotar os resultados das simulações térmicas e identificar a quantidade anual de horas de superaquecimento para cada cenário.

Ao longo do estudo, verificou-se que temperaturas de até 31°C eram aceitas dentro da faixa de conforto térmico. Isso ocorreu porque o algoritmo da EN 15251 se baseia no conceito de conforto adaptativo e considera que um código mais flexível de

vestimenta possa ser aplicado, aumentando assim o potencial de adaptação climática dos usuários. Este fato também é confirmado por pesquisas realizadas por Lamberts et al. (2011), sumarizadas em um gráfico apresentado no capítulo 4, que demonstra que é possível alcançar 90% de satisfação do usuário com temperaturas de até 31°C desde que haja movimento de ar na faixa de 1,0 m/s. De fato, já existe uma tendência de flexibilização no código de vestimenta de algumas empresas que ocupam as torres corporativas em São Paulo, principalmente quando ligadas ao segmento de tecnologia, no entanto, como ainda não foi realizado um estudo aprofundado que confirme uma significativa transformação de mentalidade em grande parte das empresas do setor com relação a este aspecto, foram adotados como método de análise para esta tese dois critérios mais conservadores. O primeiro é estabelecido pelo CIBSE (2019), que define que o desempenho térmico das edificações que operam com ventilação natural deve ser avaliado com base em horas anuais de superaquecimento acima de 28°C. Embora este critério seja mais específico para cidades do Reino Unido, ele foi concebido para avaliação de condições climáticas de verão e leva em consideração o cenário de mudança climática.

Em paralelo, avaliaram-se também as horas de superaquecimento acima de 26°C, que representa o limite superior de temperatura aceito pela norma NBR 16 401-2 (2008) em ambientes climatizados. Este seria o cenário mais conservador, pois considera como aceitáveis as mesmas condições dos ambientes climatizados por ar-condicionado e, portanto, haveria baixo impacto de aceitação mesmo em locais cujo código de vestimenta predominante seja mais restrito (com a utilização de ternos por exemplo).

Todas as simulações consideram que os edifícios de referência operam em modo misto, utilizando um sistema ativo de climatização para as horas residuais de superaquecimento, e dessa maneira, as horas acima dos limites estabelecidos de 28°C e 26 °C serão avaliadas também com base em carga de resfriamento (kWh).

Obs.: Os resultados das simulações térmicas foram apresentados utilizando a temperatura resultante para cada ambiente, que combina temperatura do ar bulbo seco com a temperatura média das superfícies.

5.5.2 Ventilação natural

Esta tese tem como abordagem primordial avaliar as condições térmicas dos espaços de trabalho e, para isso, serão realizadas também análises mais detalhadas das estratégias de projeto que podem proporcionar maior movimento de ar, de forma a compreender qual o impacto da ventilação natural na térmica dos ambientes.

Sendo assim, o critério adotado para avaliação do potencial de ventilação natural em cada um dos cenários simulados foi a taxa média de ventilação em uma semana típica de verão. O software TAS fornece, por meio da ferramenta *Results Viewer*, as taxas de ventilação para uma determinada zona, utilizando como unidade de medida as trocas de ar por horas (TAH ou ACH – *Air Changes per Hour*). Sabe-se que, nos meses com condições climáticas mais amenas, a ventilação natural tem uma função mais relacionada à salubridade do ambiente, no entanto é nos meses de verão que ela se faz mais imprescindível para arrefecimento dos usuários em prédios ventilados naturalmente. Desse modo, optou-se por avaliar as taxas de ventilação em uma semana típica de verão para sumarizar os resultados obtidos em cada cenário.

Verificou-se, ao longo das simulações, uma variação de temperatura e da taxa de ventilação entre os diversos pavimentos conectados aos átrios. Sendo assim, de forma a sintetizar os resultados, os pavimentos nos quais estão posicionadas a entrada e a saída de ar dos átrios foram escolhidos para apresentação das taxas de ventilação em cada cenário.

5.5.3 Consumo energético (cargas de resfriamento)

Um dos critérios de análise dos resultados foi o consumo energético das edificações, considerando um cenário de operação em modo misto, no qual o sistema de ar-condicionado é utilizado nas horas em que a temperatura do ar excede os limites estabelecidos de conforto. As cargas de resfriamento foram extraídas do software TAS (EDSL, 2019) para todas as horas do ano, possibilitando verificar o consumo anual de energia da edificação em análise. Os resultados foram apresentados utilizando a unidade kWh/m²/ano.

Para que seja ativado o modo misto de operação no software TAS, é necessário configurar a temperatura na qual o sistema de ar-condicionado será ativado em cada

zona. Para isso, dentro da ferramenta *Internal Conditions (Tas Building Simulator)*, as temperaturas de acionamento devem ser atribuídas, utilizando a função *Thermostat*. Nesse caso, as temperaturas de 26°C e 28°C (limites de conforto) foram utilizadas para acionamento da climatização.⁴

⁴ Para cada cenário de análise foram realizadas duas simulações para análise de cargas de resfriamento, com o termostato programado para acionar o sistema de climatização em temperaturas acima de 26°C e 28°C respectivamente.

Capítulo 6

CAPÍTULO 6. SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS: resultados e recomendações de projeto

Este capítulo discutiu o resultado das simulações realizadas para os diversos cenários de átrios e vazios abordados nesta pesquisa. Para melhor análise dos dados, os resultados de cada tipologia de átrio para cada configuração de planta, estão agrupados em tabelas fornecendo um comparativo entre os cenários simulados.

Serão apresentadas a seguir 8 tabelas para o edifício de planta quadrada e 7 tabelas para o edifício de planta retangular, perfazendo um total de 15 tabelas com as seguintes variações:

- Caso-base + sombreamento (com vento e *Sheltered*);
- Átrio periférico (com 6 e 12 pavimentos);
- Átrio adjacente ao núcleo (com 6 e 12 pavimentos);
- Átrio central: cenário propositivo (com 6 e 12 pavimentos).

Todos os cenários foram avaliados com bases nos critérios estabelecidos no capítulo 5. Além disso, para melhor ilustrar os fenômenos físicos que ocorrem em cada cenário, foi utilizado um novo recurso do software EDSL TAS, que é a visualização 3D. Como é possível verificar na Figura 105, este recurso permite visualizar em uma hora específica a variação de temperatura entre os diversos pavimentos por intermédio de cores que se referem a uma legenda de temperaturas (em graus Celsius). De forma complementar, o recurso também demonstra, por meio de setas, a entrada e saída de ar pelas aberturas do edifício (seta azul quando o ar está entrando no edifício e seta vermelha quando o ar está saindo). Outro aspecto importante é que o tamanho da seta é proporcional à intensidade do fluxo de ar entrando ou saindo pela abertura. Como pode ser visto na Figura 105 (que demonstra um cenário com átrios periféricos), as setas na entrada e saída dos vazios são significativamente maiores quando comparadas com as setas em frente das janelas. Com base em princípios básicos da física aplicada, é possível assumir que isso ocorre porque o elevado pé-direito dentro do átrio (conectando 12 pavimentos neste caso) impulsiona a ventilação natural por efeito chaminé, gerando assim um movimento de

ar mais acentuado. Mais detalhes em relação a estas análises serão abordados após a apresentação de cada uma das tabelas.

Ainda em relação à visualização 3D, o recurso permite gerar uma imagem para cada hora do ano. Assim, foi escolhido um momento no tempo que ilustrasse os principais fenômenos ocorridos de variação de temperatura entre pavimentos e taxas de ventilação, observados nas análises dos resultados anuais. Com base nesta premissa, foi gerada uma imagem para cada cenário simulado.

Adicionalmente, para melhor entendimento do desempenho térmico dos escritórios no decorrer das horas de um dia, foram desenvolvidos também gráficos de linha para os melhores cenários de cada tabela, demonstrando a variação de temperatura em uma semana típica de verão.

Por fim, será apresentada, na forma de tabela, uma classificação hierárquica demonstrando quais os melhores cenários em termos de desempenho térmico, embasando as conclusões e recomendações para o projeto arquitetônico de edifícios de escritório em São Paulo, visando ao aproveitamento da ventilação natural para o alcance de um desempenho térmico satisfatório.

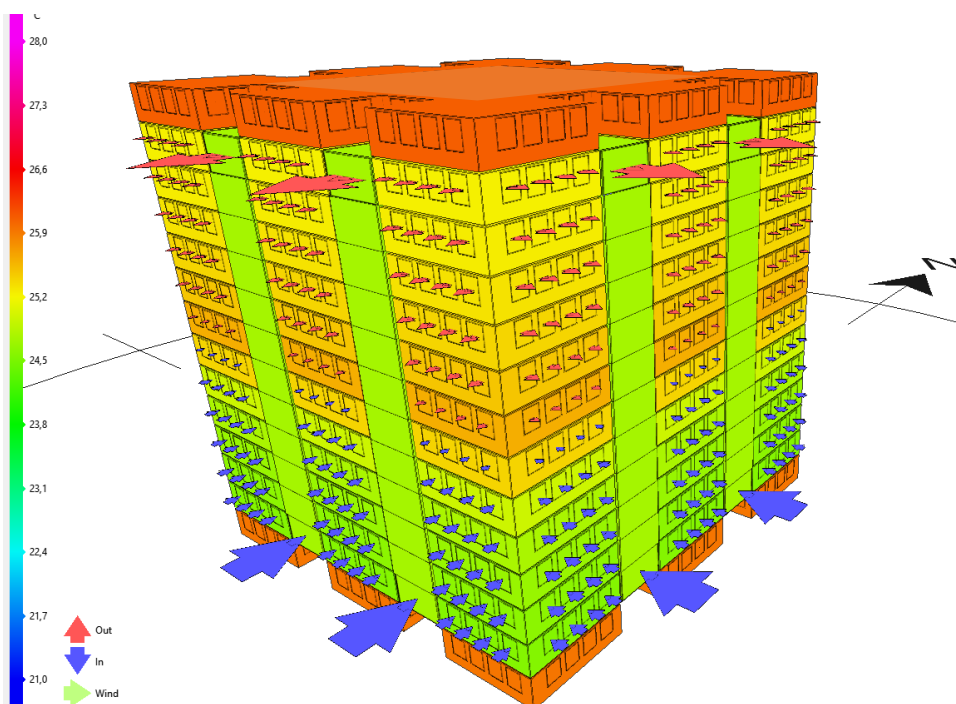


Figura 105. Exemplo de imagem extraída do recurso visualização 3D do software EDSL TAS. Cenário: átrio periférico com 12 pavimentos. Sheltered e com sombreamento.

Fonte: EDSL TAS (2019).

6.1 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS: edifício com planta quadrada

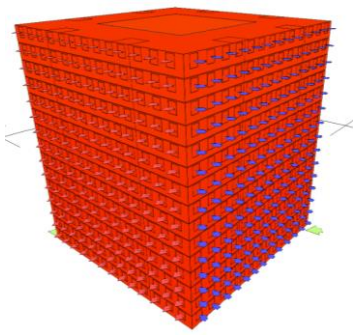
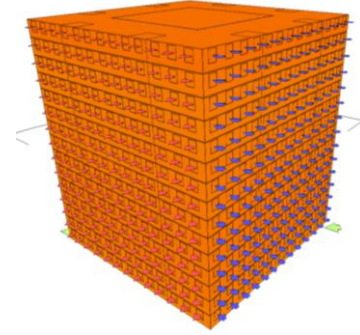
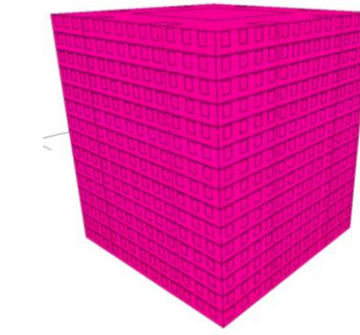
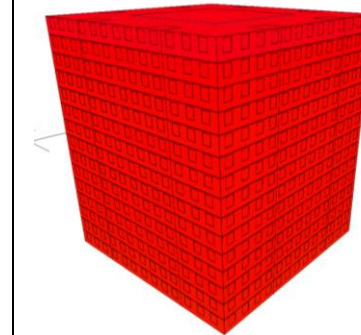
Na Tabela 4⁵ é possível verificar que o caso-base sem sombreamento apresenta uma quantidade de horas de superaquecimento muito elevada mesmo no cenário com vento. Quando aplicada a função *Sheltered* a quantidade de horas de superaquecimento quase dobra, sendo possível verificar nos gráficos a ausência das setas que indicam movimento de ar, indicando que a planta é profunda e que a taxa média de ventilação é mínima (3,33 TAH).

Quando aplicado o sombreamento no cenário “caso-base com vento externo”, as horas de superaquecimento são reduzidas significativamente e já é possível verificar as setas que indicam entrada e saída de ar em razão da ação do vento. A taxa média de ventilação é mais que 100% superior do que no caso-base “sheltered”, no entanto vale ressaltar dois aspectos importantes:

- Em ambientes urbanos, em razão da densidade e de possíveis obstruções de outros edifícios que podem bloquear os ventos, um modelo de edifício cujo sistema de ventilação se baseia integralmente na ação dos ventos pode ser pouco confiável.
- Adicionalmente, o software EDSL TAS não considera o impacto da obstrução gerada pelos dispositivos de sombreamento na fachada na taxa de ventilação interna. Para obter esse cálculo, seria necessário ter um software de CFD que calculasse a redução no Coeficiente de Pressão das janelas causada pelos dispositivos de sombreamento. Desse modo, é possível concluir que a taxa de ventilação real, mesmo em um edifício localizado em um terreno sem obstruções de outros prédios, poderia ser significativamente menor que a apresentada como resultado (no cenário com vento externo).

⁵ As legendas com cores, abaixo das tabelas, representam as temperaturas apresentadas nas imagens 3D extraídas das simulações computacionais.

Tabela 4. Caso-base e sombreamento.

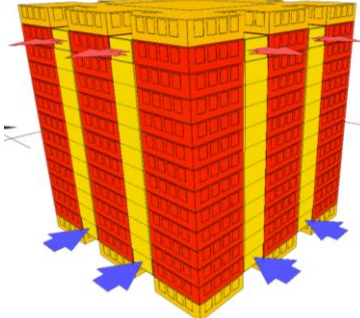
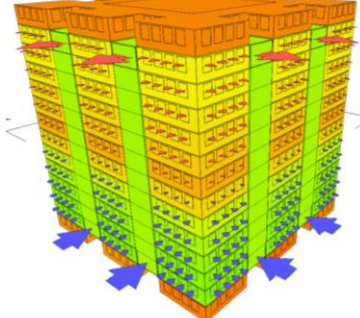
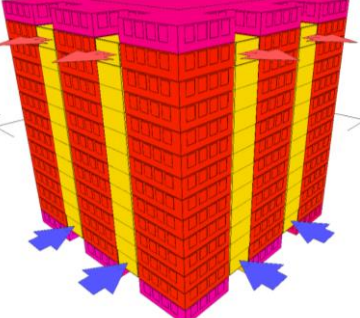
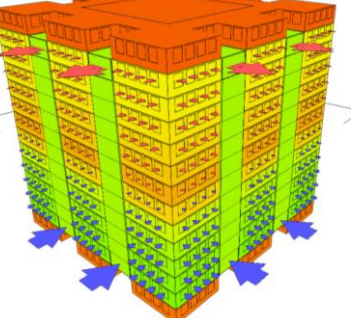
	1. Caso Base com vento externo	2. Caso Base com vento externo e sombreamento	3. Caso Base sem vento (Sheltered)	4. Caso Base com Sombreamento sem vento (Sheltered)
				
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C	391	141	756	312
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C	1089	636	1777	988
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH)	8,33	8,14	3,33	3,72
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Modo Misto	37,16	18,02	68,32	33,91
Cargas de Resfriamento - acima de 24°C (kWh/m²/ano) - Considerado o ano todo Climatizado	87,53	44,59	87,53	44,59



Por fim, o cenário “caso-base com sombreamento e a função *Sheltered* aplicada apresenta ainda quantidades elevadas de superaquecimento (312 horas), sem a presença das setas que indicam o movimento de ar. No entanto, vale ressaltar que a aplicação de sombreamento na fachada reduziu em mais de 50% as horas de superaquecimento, quando comparada ao cenário com os elementos envidraçados expostos à radiação direta. Isso comprova que os elementos de proteção solar externos têm um desempenho muito superior aos vidros Low E, em bloquear a radiação solar.

Mediante as considerações expostas acima, entende-se que as simulações mais confiáveis, para efeito de ventilação e térmica, são aquelas que utilizam a função *Sheltered* (sem vento) aplicada, pois consideram o pior cenário – sem a ação dos ventos. Desse modo, qualquer disponibilidade de movimento de ar externo irá contribuir para melhorar ainda mais o desempenho térmico dos ambientes de trabalho.

Tabela 5. Átrios periféricos grandes de 12 pavimentos: comparação *wind* x *Sheltered*.

	1. Cenário com vento externo. Ventilação somente pelo atrio. Janelas externas fechadas.	2. Cenário com vento externo. Ventilação considerando as janelas externas abertas.	3. Cenário sem vento externo. Ventilação somente pelo atrio. Janelas externas fechadas.	4. Cenário sem vento externo. Ventilação considerando as janelas externas abertas.
				
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais baixo	289	134	313	111
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais alto	335	170	399	172
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais baixo	7,96	21,06	8,08	21,47
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais alto	8,29	21,82	8,44	21,53



A Tabela 5 apresenta simulações de um edifício modelo de planta quadrada, com átrios periféricos interligando 12 pavimentos. Os dois primeiros cenários apresentam resultados para simulações com vento externo. No primeiro cenário, as únicas aberturas para entrada de ar externo estão localizadas na parte inferior dos átrios e assim a ventilação nos pavimentos é feita apenas pelas janelas internas abertas para os vazios, considerando assim as janelas externas fechadas (nesse cenário a saída de ar se dá pela parte superior dos átrios). Já o segundo cenário, considera todas as janelas externas abertas, assim como as janelas voltadas para os átrios.

Nota-se que, no segundo cenário, a inclusão das janelas externas melhorou consideravelmente o desempenho térmico dos ambientes, reduzindo em aproximadamente 50% as horas de superaquecimento. Em relação à taxa de ventilação em uma semana típica de verão, nota-se também que o cenário 2 apresenta valores significativamente maiores que o cenário 1 chegando a apresentar 21,82 trocas de ar por hora. Este resultado, tem um impacto significativo no conforto térmico dos usuários, pois sabe-se que o movimento de ar é tão importante quanto a temperatura interna, para eficiência de um edifício ventilado naturalmente.

No terceiro e quarto cenários, são apresentadas as mesmas condições dos cenários 1 e 2 (respectivamente), com a diferença de ter a função *Sheltered* aplicada (simulações sem vento externo). Os resultados foram surpreendentemente positivos. Primeiramente, em comparação com as simulações *Sheltered* da Tabela 4, contemplando o caso-base sem a presença de átrios, nota-se uma diferença significativa no que tange ao movimento do ar.

As simulações sem átrio da tabela 4, não contam com a presença de setas indicando movimento de ar externo entrando ou saindo do edifício, ao passo que na tabela 5 os cenários 3 e 4 indicam movimento de ar significativo decorrente da inserção dos vazios (demonstrado por meio das setas nas imagens de visualização 3D). Isso comprova que esse sistema de ventilação adotado, tendo como premissa inicial impulsionar a ventilação natural por meio do efeito chaminé, está funcionando de forma efetiva, pois mesmo em condições sem a presença de vento externo o sistema se demonstra eficiente.

Adicionalmente, com foco mais específico na tabela 5, observa-se que o cenário 4 (*Sheltered* com janelas abrindo para fora do prédio e para o interior dos átrios) apresenta menos horas de superaquecimento no pavimento mais inferior, quando comparado ao cenário 2, que contempla as mesmas condições de modelo, mas considera a presença de vento externo.

Com relação ao potencial de ventilação dos modelos propostos, verifica-se que, no pavimento mais baixo do cenário 4, as taxas de ventilação foram superiores ao mesmo pavimento do cenário 2 (21,47 TAH no cenário 4 em contraponto a 21,06 TAH no cenário 2). Isso demonstra que o sistema de ventilação é tão eficiente que pode trabalhar melhor sem a presença de vento externo, do que em condições com vento. É importante ainda citar que, de acordo com Baker (2012), as taxas ideais de ventilação para resfriamento fisiológico devem estar em uma faixa entre 20 e 100 trocas de ar por hora. Sendo assim, o sistema proposto está correspondendo com o desempenho esperado para obtenção de maior nível de satisfação dos usuários.

No que tange ao conforto térmico, velocidades de vento muito elevadas podem causar desconforto mesmo em dias mais quentes, conforme abordado no capítulo 4. Desse modo, de forma a obter um maior entendimento em relação às velocidades de ar entrando pelas aberturas nos modelos simulados, foi realizado um cálculo de vazão para o cenário 4 utilizando a equação recomendada por Baker (2012):

Velocidade do ar na abertura = (taxa de ventilação x volume do ambiente) / (área das aberturas x 3.600).

Sendo assim, para este cenário de átrio periférico com 12 pavimentos temos a seguinte equação:

$$\text{Velocidade do ar na abertura} = (21,53 \text{ TAH} \times 2.590 \text{ m}^3) / (37,28 \text{ m}^2 \times 3.600).$$

$$\text{Velocidade do ar na abertura} = \mathbf{0,41 \text{ m/s}}$$

Obs.: A área das aberturas já considera o sistema de janelas utilizado (Maxim-ar), que possibilita uma abertura efetiva de ventilação de 30% do vão total do caixilho.

O resultado obtido demonstra que, mesmo com taxas elevadas de ventilação, a velocidade de ar pelas aberturas é bem inferior ao limite de 1,2 m/s estabelecido

pela ASHRAE (2010) para evitar desconforto térmico com excesso de movimento de ar, e também que papéis voem nas estações de trabalho.

Outro aspecto importante a ser ressaltado é que, nos cenários com todas as janelas abertas (internas e externas), os pavimentos inferiores estão funcionando como entrada de ar (setas azuis na imagem 3D) e os pavimentos mais elevados estão funcionando como saída de ar (setas vermelhas). Isso ocorre porque o sistema de ventilação está todo interligado entre os 12 andares por intermédio dos átrios, o que possibilita que todo o grupo de pavimentos funcione de forma conjunta, conforme pode ser visto na Figura 106.

Esta interligação entre os volumes de ar dos pavimentos possibilita também um maior entendimento em relação ao fenômeno que está ocasionando uma diferença de horas de superaquecimento entre os pavimentos inferiores e superiores (sendo que nos pavimentos superiores as quantidades de horas de desconforto são sempre maiores). Uma possível explicação para esta ocorrência é de que o ar que está sendo aquecido nos pavimentos inferiores (em razão das cargas térmicas) fica mais leve e toma um movimento ascendente, causando um ambiente mais aquecido nos pavimentos mais altos. Este fenômeno é conhecido como estratificação térmica e é bem comum em edifícios ventilados por meio de átrios (BAKER, 2009; MAK, 1991; WANG, 2016).

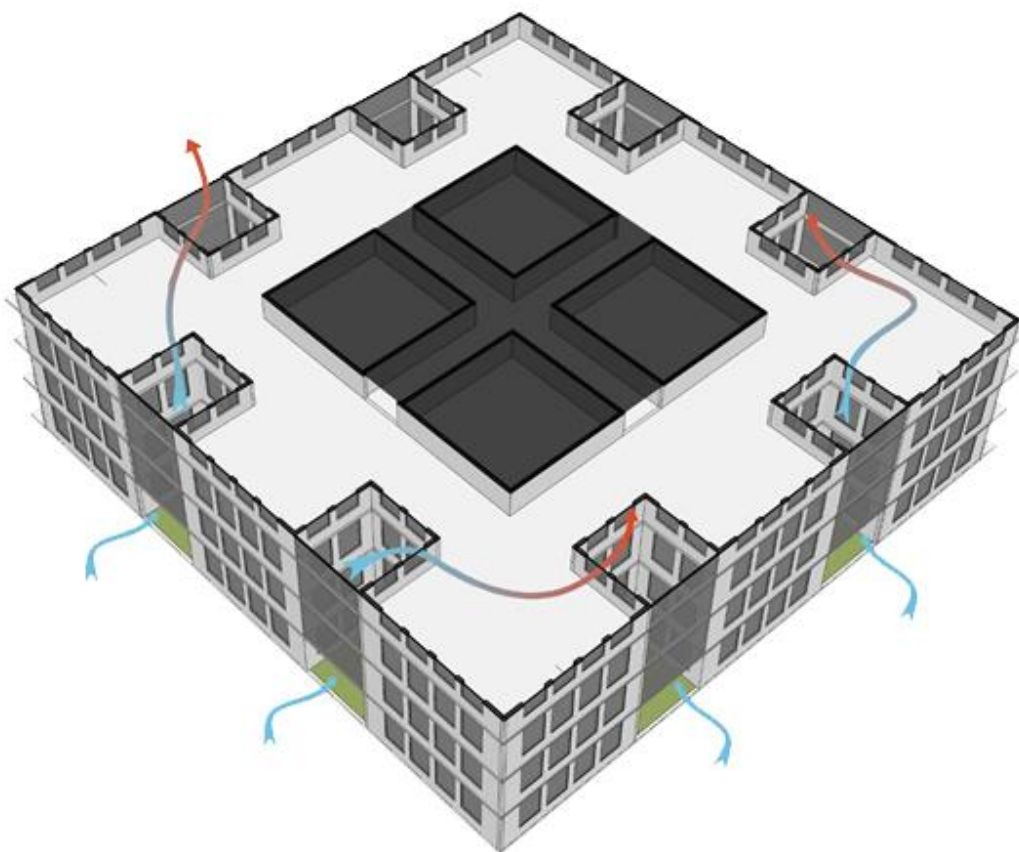


Figura 106. Vista axonométrica da tipologia de átrios periféricos demonstrando de forma esquemática a interligação do sistema de ventilação dos pavimentos por intermédio dos átrios.

Fonte: Autor da tese.

Ainda no que concerne ao fenômeno da estratificação térmica, é preciso considerar que o cenário 4, mesmo nos pavimentos mais altos (que tem mais horas de superaquecimento), apresenta aproximadamente metade das horas de superaquecimento do caso-base com sombreamento sem vento externo. Isso demonstra que, com alguma variação de temperatura entre os pavimentos, a inserção de vazios pode de fato contribuir significativamente para a melhoria das condições de conforto nos ambientes de trabalho.

Desse modo, após verificar a eficácia do sistema de ventilação com a presença de átrios, mesmo em um contexto no qual não há disponibilidade de vento externo, as demais simulações realizadas nesta pesquisa tiveram como premissa utilizar a função *Sheltered*. Além disso, no que tange às aberturas de janelas, verificou-se que o sistema é mais eficiente quando as janelas externas são consideradas abertas. Por este motivo, as demais simulações foram realizadas considerando essa condição,

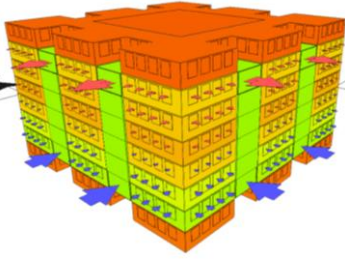
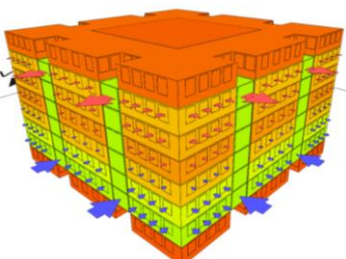
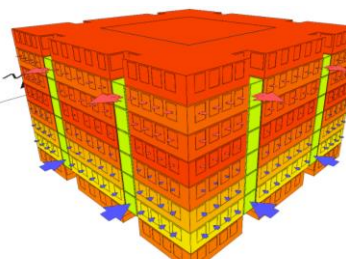
sendo coerente com a proposta da tese de mapear quais são as estratégias de projeto e operação que proporcionam melhor desempenho térmico e de ventilação, que irão refletir diretamente no conforto dos usuários. Entretanto, vale ressaltar que, após análise das horas de superaquecimento do cenário 3 (em torno de 350 horas anuais), entende-se que este sistema pode funcionar de forma eficiente durante aproximadamente seis meses no ano, podendo ser visto como uma alternativa potencial para eliminar eventuais conflitos de acústica nos ambientes de trabalho, já que os átrios são fechados com vidro em quase toda sua extensão, possibilitando assim uma barreira adicional para eventuais sons indesejáveis provenientes do contexto urbano.

Tabela 6. Átrios periféricos com 12 pavimentos.

Átrios Periféricos com 12 Pavimentos	1. Átrio Grande	2. Átrio Médio	3. Átrio Pequeno
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais baixo	111	118	133
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais alto	172	180	240
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento intermediário mais quente	181	189	250
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais baixo	512	525	563
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais alto	693	716	814
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento intermediário mais quente	718	742	843
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais baixo	21,47	18,67	13,67
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais alto	21,53	18,63	14,68
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento intermediário mais quente	11,13	9,63	7,59
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais baixo	9,48	9,72	10,43
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais alto	12,84	13,26	15,08
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento intermediário mais quente	13,30	13,74	15,62



Tabela 7. Átrios periféricos com 6 pavimentos.

Átrios Periféricos com 6 Pavimentos	1.Átrio Grande	2.Átrio Médio	3.Átrio Pequeno
			
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais baixo	132	141	161
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais alto	189	210	280
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento intermediário mais quente	199	221	295
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais baixo	562	589	676
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais alto	739	783	909
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento intermediário mais quente	778	824	957
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais baixo	16,18	13,61	8,91
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais alto	16,59	13,89	9,05
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento intermediário mais quente	8,58	7,18	4,68
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais baixo	10,41	10,91	12,52
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais alto	13,69	14,50	16,84
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento intermediário mais quente	14,40	15,26	17,72



As tabelas 6 e 7 apresentam simulações de um edifício de planta quadrada, com átrios periféricos interligando 6 e 12 pavimentos. Além da variação de altura dos átrios, foram simuladas três dimensões de vazios (pequeno, médio e grande), conforme apresentado nos cenários do capítulo 5.

Nesta série de simulações, evidenciou-se um fenômeno que está ocorrendo em todos os cenários, no entanto, com o refinamento das imagens 3D e o tratamento dos dados, foi possível identificá-lo de forma mais acurada. Como já foi mencionado anteriormente, as temperaturas dos pavimentos mais elevados são mais altas quando comparadas com as temperaturas dos pavimentos inferiores. E, entretanto, verificou-se também que nos pavimentos intermediários, onde ocorre a transição entre os andares que estão funcionando como entrada de ar e saída de ar (setas azuis e vermelhas), as temperaturas são mais elevadas que no pavimento mais alto. Isso se deve à redução significativa na taxa de ventilação que ocorre nesses pavimentos, como por exemplo no cenário 1 da tabela 6, que apresenta uma taxa de ventilação de 21,47 TAH no pavimento mais baixo, 21,53 TAH no pavimento mais alto e apenas 11,13 TAH no pavimento intermediário mais quente.

Uma possível explicação para o referido fenômeno é de que, embora as janelas externas sejam consideradas abertas, sabemos que o átrio tem uma contribuição efetiva para ampliação da ventilação por efeito chaminé (além de ser o elemento que conecta todos os pavimentos) e esses pavimentos intermediários que têm apresentado taxas menores de ventilação são os que estão mais distantes das entradas e saídas (“inlet e outlet”) de ar nos átrios. Por esta razão, entende-se que há uma perda de carga na ventilação desses pavimentos, que posteriormente é retomada nos pavimentos mais altos em razão da sucção exercida pelas grandes aberturas de saída de ar dos átrios no pavimento mais elevado do grupo.

O cenário 1 da tabela 6, que contém átrios grandes com 12 pavimentos, apresentou o melhor resultado entre todos os cenários simulados para a tipologia de átrios periféricos, com 111 horas de superaquecimento (acima de 28°C) no pavimento mais baixo, 172 no pavimento mais alto e 181 no pavimento intermediário mais quente, o que representa uma redução de aproximadamente 81% em relação ao caso-base em um cenário sem vento. As taxas médias de ventilação em uma semana típica de verão chegaram a 21,53 TAH, valor elevado quando considerada a ausência de vento

externo. Conforme mencionado no capítulo 5, nas tabelas 6 e 7 também são apresentadas as horas de superaquecimento acima de 26°C, considerando um cenário mais conservador de operação em modo misto. Observa-se que, nesse caso, houve um aumento significativo nas horas de superaquecimento, com 512 horas no pavimento mais baixo, 693 no pavimento mais alto e 718 no pavimento intermediário mais quente. Estes dados demonstram que, quando em modo de ventilação natural, o pavimento mais quente do cluster tem 537 horas anuais entre as temperaturas 26°C e 28°C, em contraste com as 401 horas do pavimento mais baixo.

O cenário de pior desempenho foi o de átrios pequenos com 6 pavimentos, que apresentou 161 horas anuais de desconforto no pavimento mais baixo (acima de 28°C), 280 no pavimento mais elevado e 295 horas no pavimento intermediário mais quente. Quando considerado 26°C como o limite aceitável para as temperaturas internas, as horas de superaquecimento sobem para 676 no pavimento mais baixo, 909 no pavimento mais alto e 957 no pavimento intermediário mais quente. É interessante ressaltar que como tendência geral, os átrios com 6 pavimentos desempenharam de maneira menos favorável que os átrios com 12 pavimentos, tanto no quesito térmico como também no que tange à taxa de ventilação dos escritórios. A única exceção foi o cenário com átrio grande de 6 pavimentos, que teve no andar mais baixo horas semelhantes de superaquecimento às do cenário de átrios pequenos com 12 pavimentos. No entanto, nos andares intermediários e mais elevados, o desempenho térmico do átrio de 6 pavimentos foi superior ao do átrio de 12 pavimentos. Outro aspecto que demonstra o desempenho mais favorável do átrio de 6 pavimentos, neste caso, foi a taxa de ventilação: 16,59 TAH sendo a taxa mais favorável do átrio de 6 pavimentos, em contraste com 14,68 TAH para o átrio de 12.

Ainda em relação ao desempenho ambiental dos átrios, quando comparados vazios de mesmas dimensões, mas com alturas diferentes (6 e 12 pavimentos), nota-se também que a diferença de horas de superaquecimento não é tão significativa. Por exemplo, no caso dos átrios periféricos grandes, no cenário com 6 pavimentos, as horas de superaquecimento acima de 28°C aumentaram 18,9% no andar mais baixo quando comparadas com o cenário com 12 pavimentos. Nos andares intermediários e mais elevados, esse aumento foi de aproximadamente 8,6%. Entretanto, verificou-se uma variação bem mais significativa nas taxas de ventilação quando comparadas as duas alturas distintas de átrios. Ainda no exemplo dos átrios grandes, verificou-se

que a taxa de ventilação é aproximadamente 25% maior no cenário de 12 pavimentos, em comparação com o cenário com 6 pavimentos (nos pavimentos mais baixos e mais altos). Nos andares intermediários essa variação se manteve na faixa dos 30%. É importante destacar este aspecto pois, comparando somente as variações de temperatura entre os átrios com alturas distintas, não fica tão evidente a diferença de desempenho ambiental entre os dois cenários. Porém, quando analisadas as taxas de ventilação, observa-se que o cenário dos vazios com 12 pavimentos tem um potencial significativamente maior de ofertar conforto térmico por intermédio do movimento de ar.

De modo a obter um maior entendimento em relação a quais momentos ao longo do ano as horas de superaquecimento estão ocorrendo com mais frequência, foi desenvolvida uma tabela que demonstra o total de horas de desconforto por mês. Com pode ser visto na Tabela 8, durante seis meses do ano não há ocorrências de horas de superaquecimento acima de 28°C e a quantidade de horas acima de 26°C não é significativa (no máximo 30 horas no mês de abril). Em paralelo, nos meses de outubro e novembro a quantidade de horas em desconforto acima de 28°C é praticamente desprezível (2 e 4 horas respectivamente). Sendo assim, podemos entender que o sistema proposto pode operar 100% em modo de ventilação natural durante oito meses do ano (considerando que oportunidades de adaptação ao ambiente térmico, como um ventilador de mesa, sejam oferecidas, permitindo assim uma tolerância maior a temperaturas de até 28°C). Nos quatro meses remanescentes, o modo misto** é recomendado, sendo que os meses mais quentes são janeiro e março.

Tabela 8. Horas de superaquecimento por mês para o cenário com átrios periféricos grandes de 12 pavimentos (pavimento mais baixo).

Átrios periféricos grandes com 12 pavimentos		
Meses	Horas acima de 28°C	Horas acima de 26°C
Janeiro	46	144
Fevereiro	19	84

** O modo misto consiste em uma operação na qual o uso da ventilação natural é alternado com o de sistemas ativos de condicionamento de ar.

Março	23	101
Abril	0	30
Maio	0	6
Junho	0	0
Julho	0	0
Agosto	0	11
Setembro	0	14
Outubro	2	17
Novembro	4	24
Dezembro	17	81

Com o objetivo de fazer uma leitura mais precisa da variação de temperatura diária ao longo dos dias mais quentes, foi desenvolvido um gráfico (Figura 107) que demonstra a temperatura de três pavimentos ao longo de uma semana típica de verão. A faixa vermelha representa os limites estabelecidos das temperaturas aceitáveis de conforto (26°C na parte inferior e 28°C na parte superior). Primeiramente, o gráfico evidenciou a importância de ter a massa térmica exposta, o que proporcionou nos dias mais quentes uma redução da temperatura interna de até 3°C em relação à temperatura externa.

Adicionalmente verificou-se que nos dias mais quentes as temperaturas dos escritórios excedem o limite de 28°C a partir das 12h e 13h, permanecendo acima desse limite durante toda a tarde. Quando considerado o limite de 26°C, as temperaturas de desconforto iniciam entre 10h e 11h. Isso demonstra que, quando adotado o limite mais alto de aceitação térmica, é possível operar toda a manhã em modo de ventilação natural e somente no período da tarde utilizar o modo climatizado, o que representaria uma facilidade na operação do edifício e na mentalidade de aceitação do modo misto por parte dos usuários^{***}.

^{***} Atualmente o escritório de projetos do autor desta tese já opera desta maneira e tem encontrado boa aceitação por parte dos demais usuários.

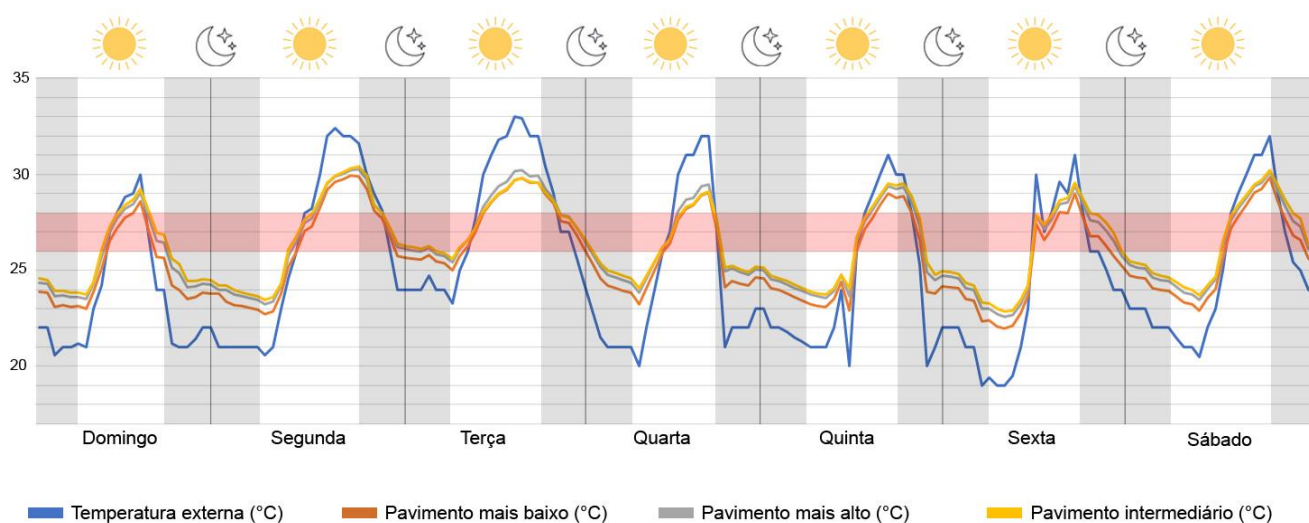


Figura 107. Gráfico de linhas demonstrando a variação de temperatura ao longo de uma semana com temperaturas elevadas de verão para o cenário: átrios periféricos grandes com 12 pavimentos.

Fonte: Autor da tese.

Outro fator de comparação apresentado nas tabelas 6 e 7, foram as consequentes cargas de resfriamento. No melhor cenário (átrios grandes com 12 pavimentos), a carga anual de resfriamento para o pavimento mais baixo foi de 9,48 kWh/m², 12,84 kWh/m² para o andar mais elevado e 13,30 kWh/m² para o pavimento intermediário mais quente. Isso demonstra uma redução média de aproximadamente 74,5 kWh/m² ano para todos os pavimentos em relação ao caso-base (com termostato em 24°C, que é prática comum dos prédios de escritório de caixa selada de vidro). Desse modo, se considerarmos um prédio de 36 pavimentos, podemos tecer a seguinte análise referente à economia de energia:

- Área útil do pavimento tipo: 1.200 m² x 36 pavimentos = 43.200,00 m² (área útil total do edifício);
- 74,5 kWh/m² x 43.200,00 = 3.218.400,00 kWh
- Para se alcançar uma avaliação mais precisa em relação ao total de energia que deixou de ser consumida para fins de climatização em um ano de operação do edifício, é necessário aplicar o COP (coeficiente de desempenho) do equipamento de ar-condicionado na fórmula de consumo energético. O Manual sobre Sistemas de Água Gelada (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2017) recomenda utilizar um COP de 6,419 para uma CAG com *Chillers* do tipo

centrifugo. Sendo assim, o total de energia anual que deixou de ser consumida com o sistema de ar-condicionado neste caso é de: $3.218.400,00 \text{ kWh} / 6,419 = 501.386,50 \text{ kWh}$

- A tarifa média do kWh em São Paulo, segundo a Aneel (2020), é de R\$ 0,54. No entanto este valor não considera os impostos. De acordo com a ENEL (2020), deve-se se acrescentar ao valor da tarifa: 18% de ICMS, 0,65% para o PIS e 3% para o Cofins. Desse modo a tarifa convencional em São Paulo com todos os impostos é de R\$ 0,65 por kWh;
- Sendo assim, a economia financeira anual para fins de resfriamento, proporcionada por esta estratégia de projeto é de:
 $501.386,50 \text{ kWh} \times \text{R\$ } 0,65 = \text{R\$ } 325.901,22$ (trezentos e vinte e cinco mil e novecentos e um reais).

Tabela 9. Átrios adjacentes ao núcleo com 12 pavimentos.

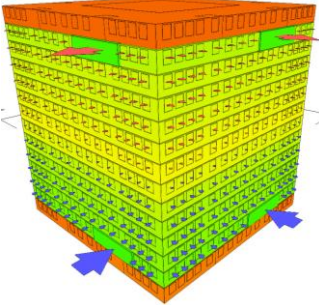
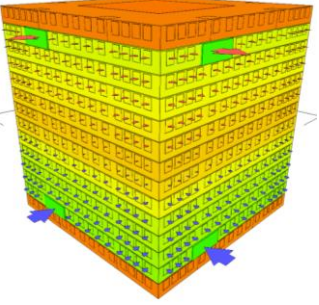
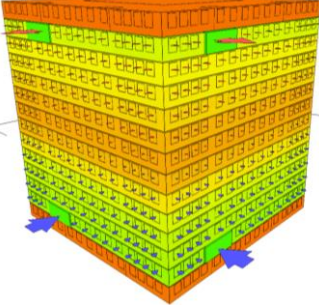
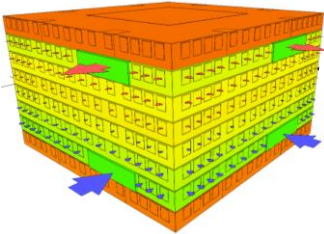
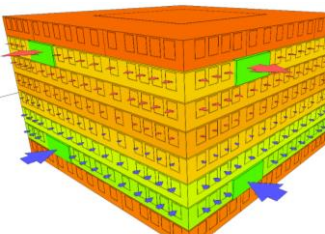
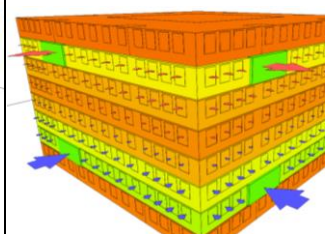
Átrios Adjacentes ao Núcleo com 12 Pavimentos	1.Átrio Grande	2.Átrio Médio	3.Átrio Pequeno
			
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais baixo	88	91	95
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais alto	122	133	141
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento intermediário mais quente	147	151	159
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais baixo	460	466	476
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais alto	588	626	656
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento intermediário mais quente	594	688	716
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais baixo	27,5	23,99	21,12
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais alto	27,68	24,06	21,19
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento intermediário mais quente	13,04	9,30	8,19
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais baixo	8,52	8,63	8,82
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais alto	10,89	11,59	12,15
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento intermediário mais quente	11,00	12,74	13,26



Tabela 10. Átrios adjacentes ao núcleo com 6 pavimentos.

Átrios Adjacentes ao Núcleo com 6 Pavimentos	1.Átrio Grande	2.Átrio Médio	3.Átrio Pequeno
			
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais baixo	98	112	117
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais alto	138	166	175
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento intermediário mais quente	164	188	184
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais baixo	486	516	527
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais alto	628	674	701
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento intermediário mais quente	662	710	758
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais baixo	18,3	15,58	12,84
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais alto	19,49	15,02	12,86
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento intermediário mais quente	11,31	9,24	8,14
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais baixo	9,00	9,56	9,76
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais alto	11,63	12,48	12,98
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento intermediário mais quente	12,26	13,15	14,04



As tabelas 9 e 10 apresentam simulações de um edifício de planta quadrada, com átrios adjacentes ao núcleo de serviços interligando 6 e 12 pavimentos. Assim como nos cenários apresentados anteriormente, a entrada de ar nos átrios se dá pelo pavimento mais baixo e a saída pelo pavimento mais alto, tirando então máximo proveito da altura para impulsionar a ventilação por efeito chaminé. Além da variação na quantidade de pavimentos, foram simuladas três dimensões de vazios (pequeno, médio e grande), conforme apresentado nos cenários do capítulo 5. Nesta sequência de simulações, assim como nas tabelas 6 e 7, nota-se o fenômeno da estratificação térmica elevando as temperaturas nos pavimentos mais altos.

O cenário 1 da tabela 9, que contém átrios grandes com 12 pavimentos, apresentou o melhor resultado entre todos os cenários simulados para a tipologia de átrios adjacentes ao núcleo, com apenas 88 horas de superaquecimento (acima de 28°C) no pavimento mais baixo, 122 no pavimento mais alto e 147 no pavimento intermediário mais quente, o que representa uma redução de 20 a 30% (dependendo do pavimento) em relação ao melhor cenário da tipologia de átrios periféricos. Em relação ao caso-base (sem sombreamento e sem vento externo), essa redução é de aproximadamente 85%. As taxas médias de ventilação em uma semana típica de verão aumentaram em 28,56% (em relação ao cenário 1 da tabela 6) e chegaram a 27,68 TAH. Considerando 26°C como limite de aceitação térmica, obteve-se 460 horas no pavimento mais baixo, 588 no pavimento mais alto e 594 no pavimento intermediário mais quente.

Assim como na tipologia de átrio periférico, o cenário de pior desempenho foi o átrio pequeno com 6 pavimentos que apresentou 117 horas anuais de desconforto no pavimento mais baixo (acima de 28°C), 175 no pavimento mais elevado e 184 horas no pavimento intermediário mais quente. Vale ressaltar que houve uma redução de aproximadamente 38% no pavimento mais alto e intermediário em relação ao mesmo cenário na tipologia de átrio periférico. Quando considerado 26°C como o limite aceitável para as temperaturas internas, as horas de superaquecimento sobem para 527 no pavimento mais baixo, 701 no pavimento mais alto e 758 no pavimento intermediário mais quente. As taxas de ventilação nesse cenário também foram significativamente menores que no cenário de átrios grandes com 12 pavimentos, com 12,84 TAH no pavimento mais baixo, 12,86 TAH no pavimento mais alto e 8,14 TAH no pavimento intermediário mais quente.

Um aspecto interessante a ressaltar é que o desempenho térmico do pior cenário na tipologia de átrios adjacentes se assemelha significativamente ao melhor cenário da tipologia de átrios periféricos. Uma possível explicação para esse melhor desempenho é a posição na qual se encontram os vazios nas plantas. O fato de os vazios estarem mais próximos do centro da planta, na tipologia de átrios adjacentes ao núcleo, possibilita que a ventilação cruzada entre os vazios e a fachada externa remova os ganhos de calores indesejáveis das partes mais profundas da planta. Além disso, a posição dos átrios junto ao núcleo de serviço diminui a profundidade da área útil de planta, tornando o ambiente mais favorável para ventilação.

Com relação ao mapeamento das horas de superaquecimento ao longo do ano, verifica-se na Tabela 11 que, quando considerado 28°C como limite máximo aceitável de temperatura nos ambientes internos, nos meses entre abril e novembro (2/3 do ano) é possível operar 100% do tempo com ventilação natural (no melhor cenário da tipologia de átrio adjacente ao núcleo). Mesmo quando considerado 26°C como limite aceitável, a quantidade de horas de desconforto é tão pequena (27 horas no mês menos favorável) que não justificaria a utilização de um sistema ativo de resfriamento. Essa quantidade de horas poderia ser mitigada com a utilização de ventiladores de mesa que, de acordo com Baker (2011), podem aumentar a faixa de conforto térmico em até 3°C. Nos demais meses, a utilização de um sistema em modo misto seria a solução mais recomendável.

Tabela 11. Horas de superaquecimento por mês para o cenário com átrios grandes adjacentes ao núcleo com 12 pavimentos (pavimento mais baixo).

Átrios grandes adjacentes ao núcleo com 12 pavimentos		
Meses	Horas acima de 28°C	Horas acima de 26°C
Janeiro	43	140
Fevereiro	9	79
Março	20	89
Abril	0	27
Maio	0	2
Junho	0	0
Julho	0	0

Agosto	0	9
Setembro	0	10
Outubro	2	16
Novembro	1	17
Dezembro	13	71

Com relação à variação de temperatura diária, verifica-se na figura 108 que, em razão da inércia térmica e da ventilação noturna, que retira o calor excedente proveniente da ocupação diurna, a temperatura interna no pavimento inferior chega a ser quase 4°C mais baixa que a temperatura externa. Outro aspecto interessante é que, embora os pavimentos intermediários tenham apresentado a maior quantidade de horas de superaquecimento, em alguns momentos de pico de temperatura, o pavimento mais alto apresentou temperaturas mais elevadas (em até 0,5°C acima).

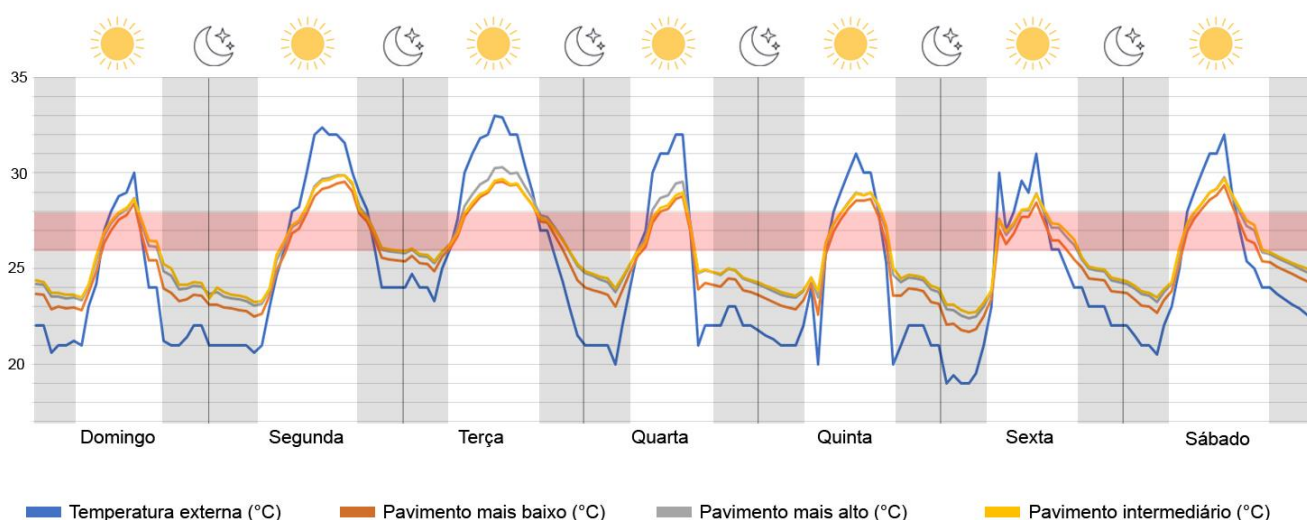


Figura 108. Gráfico de linhas demonstrando a variação de temperatura ao longo de uma semana com temperaturas elevadas de verão para o cenário: átrios grandes adjacentes ao núcleo com 12 pavimentos.

Fonte: Autor da tese.

No que se refere às cargas de resfriamento, o melhor cenário foi o de átrios grandes com 12 pavimentos, cuja carga anual de resfriamento para o pavimento mais baixo foi de 8,52 kWh/m², 10,89 kWh/m² para o andar mais elevado e 11,00 kWh/m² para o pavimento intermediário mais quente. Isso demonstra uma redução média de aproximadamente 77,5 kWh/m² ao ano para todos os pavimentos em relação ao caso-

base (com termostato em 24°C, que é prática comum dos prédios de escritório de caixa selada de vidro). Desse modo, se considerarmos um prédio de 36 pavimentos com área total útil de 43.200,00 m², a economia anual de energia para fins de resfriamento será de 3.348.000,00 kWh / 6,419 (COP) = 521.576,56 kWh, o que equivale atualmente a **R\$ 339.024,76** (trezentos e trinta e nove mil e vinte e quatro reais), com o custo do kWh a R\$ 0,65.

Tabela 12. Átiro central com 12 pavimentos.

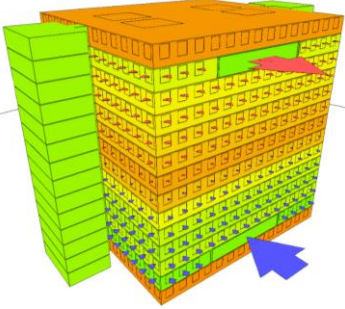
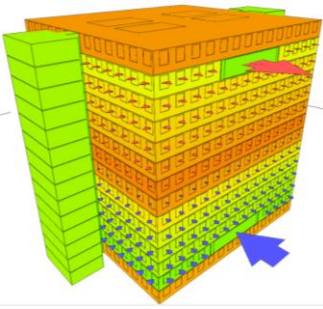
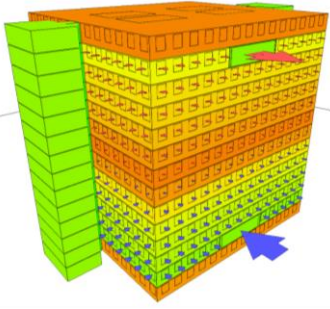
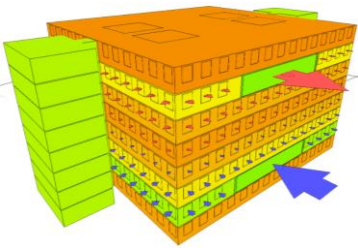
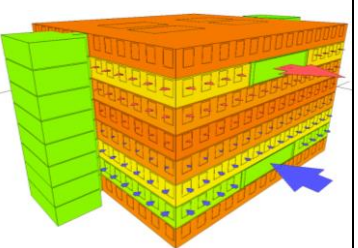
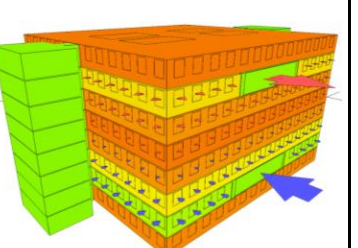
<p>Átiro Central (Cenário propositivo) com 12 Pavimentos</p>	1.Átiro Grande	2.Átiro Médio	3.Átiro Pequeno
			
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais baixo	99	106	112
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais alto	148	157	171
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento intermediário mais quente	169	178	183
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais baixo	504	511	523
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais alto	650	696	715
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento intermediário mais quente	762	806	824
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais baixo	20,89	18,64	16,12
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais alto	21,03	18,66	16,98
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento intermediário mais quente	8,86	7,02	6,64
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais baixo	9,33	9,46	9,69
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais alto	12,04	12,89	13,24
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento intermediário mais quente	13,71	14,69	15,26



Tabela 13. Átrio central com 6 pavimentos.

Átrio Central (Cenário propositivo) com 6 Pavimentos	1.Átrio Grande	2.Átrio Médio	3.Átrio Pequeno
			
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais baixo	133	142	149
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais alto	192	208	221
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento intermediário mais quente	203	224	235
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais baixo	563	601	639
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais alto	744	779	813
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento intermediário mais quente	790	814	861
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais baixo	11,97	9,6	8,65
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais alto	11,61	9,88	8,06
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento intermediário mais quente	8,21	6,98	6,16
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais baixo	10,43	11,13	11,84
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais alto	13,78	14,43	15,06
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento intermediário mais quente	14,63	15,08	15,95



As tabelas 12 e 13 apresentam simulações de um edifício de planta quadrada, com átrios localizados no centro da planta, interligando 6 e 12 pavimentos. Conforme mencionado anteriormente, essa conformação de planta só é possível em um cenário propositivo, em contraste com os cenários apresentados anteriormente, que são viáveis em casos de *retrofit*. Assim como nos demais cenários, a entrada de ar nos átrios se dá pelo pavimento mais baixo e a saída pelo pavimento mais alto. Foram simuladas três dimensões de vazios centrais (pequeno, médio e grande) e átrios com 6 e 12 pavimentos. Nesta sequência de simulações, assim como nos cenários apresentados anteriormente, também se nota o fenômeno da estratificação térmica elevando as temperaturas nos pavimentos mais altos.

O cenário 1 da tabela 12, que contém átrios grandes com 12 pavimentos, apresentou o melhor resultado entre todos os cenários simulados para a tipologia de átrios centrais, com 99 horas de superaquecimento (acima de 28°C) no pavimento mais baixo, 148 no pavimento mais alto e 169 no pavimento intermediário mais quente, o que representa um aumento de 12,5% no pavimento mais baixo em relação ao melhor cenário da tipologia de átrios adjacentes ao núcleo. Para o pavimento mais alto esse aumento foi de 21,31% e 14,96% para o pavimento intermediário mais quente. Completando, as taxas médias de ventilação em uma semana típica de verão são menores que nos cenários dos átrios adjacentes ao núcleo e semelhantes às taxas alcançadas nos cenários de átrios periféricos. Nos pavimentos mais baixos e mais altos as taxas de ventilação foram de 20,89 TAH e 21,03 TAH, respectivamente, em contraste com a taxa de 8,86 TAH no pavimento intermediário mais quente. Considerando 26°C como limite de aceitação térmica, obteve-se 504 horas no pavimento mais baixo, 650 no pavimento mais alto e 762 no pavimento intermediário mais quente.

Assim como nas demais tipologias de átrio, o cenário de pior desempenho foi o átrio pequeno com 6 pavimentos, que apresentou 149 horas anuais de desconforto no pavimento mais baixo (acima de 28°C), 221 no pavimento mais elevado e 235 horas no pavimento intermediário mais quente. Quando considerado 26°C como o limite aceitável para as temperaturas internas, as horas de superaquecimento sobem para 639 no pavimento mais baixo, 813 no pavimento mais alto e 861 no pavimento intermediário mais quente. As taxas de ventilação nesse cenário também foram significativamente menores que no cenário de átrios grandes com 12 pavimentos, com

8,65 TAH no pavimento mais baixo, 8,06 TAH no pavimento mais alto e 6,16 TAH no pavimento intermediário mais quente.

Um aspecto bem interessante a ser observado nesta série de simulações é que, embora este seja um cenário propositivo e esperava-se obter um melhor desempenho em relação aos demais cenários (*retrofit*), esta expectativa não foi de fato correspondida, pois esse cenário com átrios centrais tem desempenho térmico inferior ao cenário de átrios adjacentes ao núcleo (mas superior ao cenário com átrios periféricos). Uma possível explicação para isso é que, embora o vazio esteja posicionado na melhor localização de modo a exercer uma ventilação cruzada com a fachada externa, na proposta arquitetônica deste modelo, buscou-se manter coerência com as restrições de projeto (premissas iniciais), tanto no aspecto formal (forma quadrada) quanto na metragem quadrada do núcleo de serviços.

Desse modo, após testar algumas posições para o núcleo na planta quadrada com vazio central, chegou-se à conclusão de que nesta tipologia, o núcleo sempre vai exercer algum bloqueio impedindo que a ventilação cruzada ocorra eficientemente na integridade da planta. Em uma das opções, o núcleo estaria bloqueando toda uma fachada quando localizado na área externa, ou seja, bloqueando o acesso livre ao vento em alguma parte da planta, como ocorre também no cenário proposto e pode ser visto em melhor detalhe na perspectiva axonométrica da Figura 109. Em contrapartida, quando se tem o núcleo na posição central e os vazios são localizados de forma adjacente, além de reduzir a profundidade da planta, nenhuma área fica sem a possibilidade de ter uma ventilação cruzada desobstruída (Figura 110), proporcionando assim um ambiente mais favorável para ventilação natural.

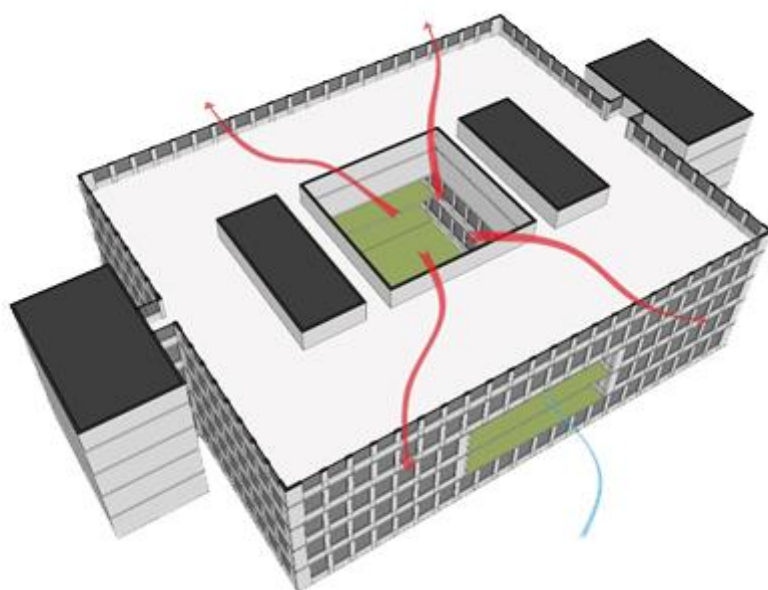


Figura 109. Vista axonométrica da tipologia de átrios centrais (cenário propositivo) demonstrando que os núcleos internos acabam bloqueando a ventilação natural interna em algumas áreas da planta.

Fonte: Autor da tese.

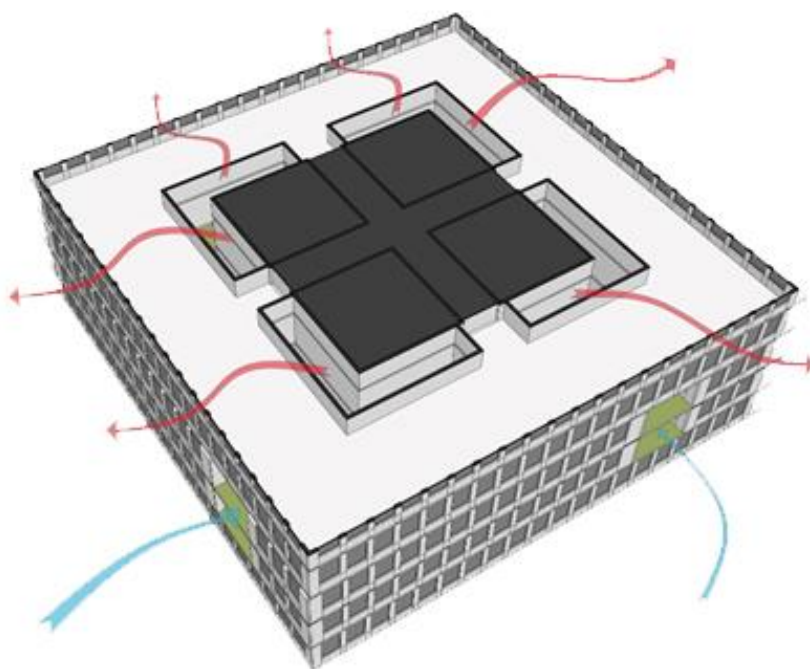


Figura 110. Vista axonométrica da tipologia de átrios adjacentes ao núcleo demonstrando de forma esquemática que a profundidade da planta foi reduzida e que todas as áreas da planta têm a possibilidade de ventilação cruzada.

Fonte: Autor da tese.

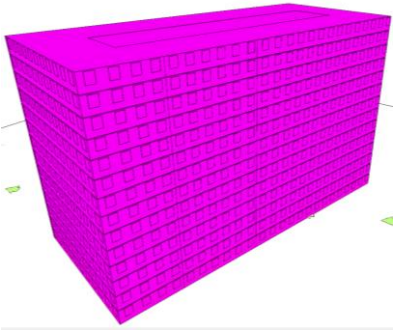
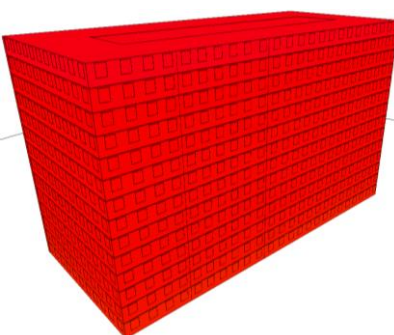
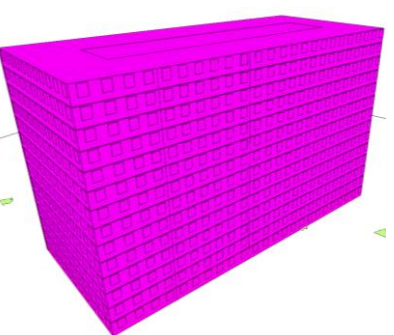
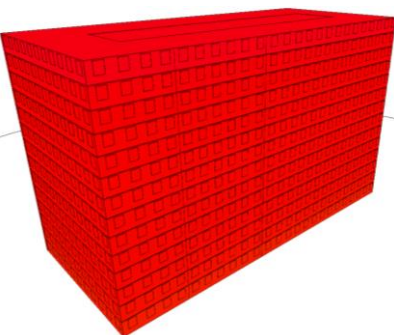
No que diz respeito ao mapeamento das horas de superaquecimento para todos os meses do ano, verificou-se que os resultados encontrados são semelhantes aos das demais tipologias apresentadas anteriormente, com oito meses do ano sendo favoráveis à ventilação natural durante todo o tempo de ocupação.

Em relação às cargas de resfriamento, o melhor cenário foi o de átrios grandes com 12 pavimentos, cuja carga anual de resfriamento para o pavimento mais baixo foi de 9,33 kWh/m², 12,04 kWh/m² para o andar mais elevado e 14,11 kWh/m² para o pavimento intermediário mais quente. Isso demonstra uma redução média de aproximadamente 76 kWh/m² ao ano para todos os pavimentos em relação ao caso-base (com termostato em 24°C, que é prática comum dos prédios de escritório de caixa selada de vidro). Deste modo, se considerarmos um prédio de 36 pavimentos com área total útil de 43.200,00m², a economia anual de energia para fins de resfriamento será de 3.283.200,00 kWh / 6,419 (COP) = 511.481,53, o que equivale, atualmente, a **R\$ 332.462,99** (trezentos e trinta e dois mil e quatrocentos e sessenta e dois reais), considerando R\$ 0,65 o custo do kWh.

6.2 SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS: *edifício com planta retangular*

A Tabela 14 apresenta simulações para um edifício de referência (caso-base) com a tipologia de planta retangular, conforme detalhado no capítulo 5. Os cenários 1 e 2 da Tabela 14 demonstram simulações nas quais as principais fachadas do caso-base estão voltadas para a orientação norte-sul, com a distinção de que em um dos cenários há presença de sombreamento externo e no outro não. Já os cenários 3 e 4, consideram os mesmos modelos dos cenários 1 e 2 (respectivamente), no entanto com as suas principais fachadas orientadas para leste e oeste.

Tabela 14. Caso-base nas orientações norte-sul e leste-oeste (sem vento externo).

	1. Caso Base Orientação Norte - Sul (Sheltered)	2. Caso Base com Sombreamento Orientação Norte -Sul (Sheltered)	3. Caso Base Orientação Leste - Oeste (Sheltered)	4. Caso Base com Sombreamento Orientação Leste - Oeste (Sheltered)
				
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C	768	357	954	371
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C	1812	1060	2177	1089
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH)	3,05	3,31	3,12	3,04
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Modo Misto	69,89	36,38	83,96	37,42
Cargas de Resfriamento - acima de 24°C (kWh/m²/ano) - Considerado o ano todo Climatizado	91,25	47,83	109,63	49,15



Ao analisar os resultados explicitados na planilha, é possível verificar que as horas de superaquecimento do caso-base sem sombreamento (orientação norte-sul) são semelhantes ao mesmo cenário no modelo com planta quadrada. No entanto nas simulações para a orientação leste-oeste, a ausência de sombreamento externo, em adição ao fato de que essas fachadas recebem maior quantidade de radiação direta, resultou em um aumento de 25% em relação ao cenário 1. A quantidade de horas de superaquecimento foi de 954 para um limite de aceitação térmica de 28°C e 2.177 para um limite de 26°C. Estes resultados são tão altos que praticamente inviabilizam o uso de ventilação natural, pois mesmo em um modo misto a operação seria complexa, com a possibilidade de haver superaquecimento mesmo nos meses mais amenos do ano. Esse aumento também se reflete no consumo de energia. Quando considerada operação em modo misto, o consumo anual de energia é de 83,96 kWh/m² e de 109,63 kWh/m² para um edifício climatizado durante todo o ano, com termostato programado para uma temperatura constante de 24°C.

No cenário 4, os resultados demonstram que o sombreamento está sendo aplicado de forma eficiente, pois nesse caso as horas de superaquecimento ficaram semelhantes ao cenário 2 (orientação norte-sul), com um aumento de apenas 4 %.

Em todos os casos, as taxas de ventilação foram significativamente baixas, com um valor médio de 3,1 TAH. Este resultado confirma as análises realizadas para o caso-base de planta quadrada, que demonstra que, sem aplicação de vazios, os escritórios dependeriam do vento externo para proporcionar conforto aos usuários por intermédio do movimento de ar.

Tabela 15. Átrios periféricos com 12 pavimentos.

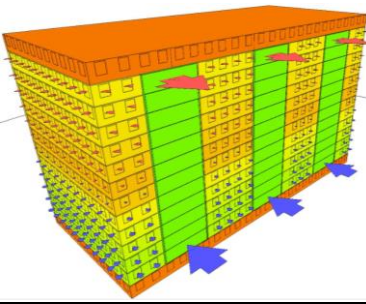
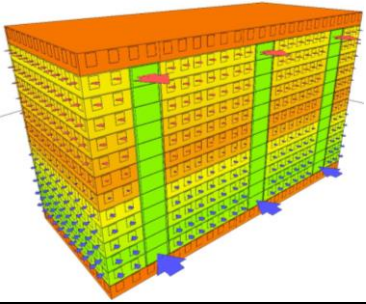
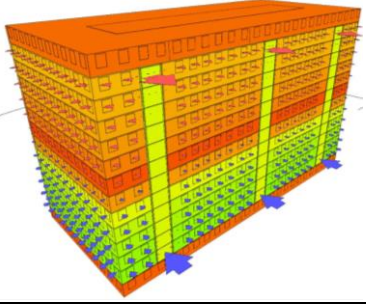
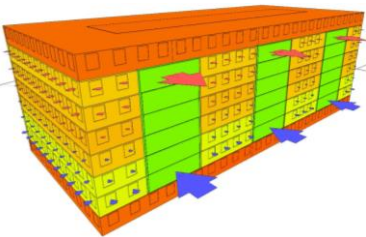
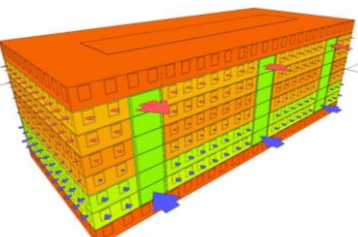
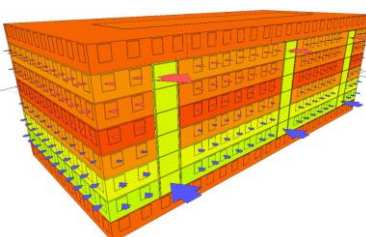
Átrios Periféricos com 12 Pavimentos	1. Átrio Grande	2. Átrio Médio	3. Átrio Pequeno
			
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais baixo	126	130	139
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais alto	181	192	204
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento intermediário mais quente	191	207	225
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais baixo	528	561	574
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais alto	651	710	765
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento intermediário mais quente	708	756	811
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais baixo	18,37	16,32	14,25
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais alto	18,49	16,79	14,64
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento intermediário mais quente	8,39	7,41	6,43
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais baixo	9,78	10,39	10,63
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais alto	12,06	13,15	14,17
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento intermediário mais quente	13,11	14,00	15,02



Tabela 16. Átrios periféricos com 6 pavimentos.

Átrios Periféricos com 6 Pavimentos	1. Átrio Grande	2. Átrio Médio	3. Átrio Pequeno
			
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais baixo	135	148	156
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais alto	198	218	241
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento intermediário mais quente	211	230	278
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais baixo	551	573	614
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais alto	700	739	822
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento intermediário mais quente	707	750	846
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais baixo	14,68	12,71	10,31
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais alto	14,79	12,83	10,50
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento intermediário mais quente	7,95	7,11	6,05
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais baixo	10,21	10,61	11,37
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais alto	12,97	13,69	15,22
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento intermediário mais quente	13,09	13,89	15,67



As tabelas 15 e 16 apresentam simulações de um edifício de planta retangular, com átrios periféricos interligando 6 e 12 pavimentos. Além da variação de altura dos átrios, foram simuladas três dimensões de vazios (pequeno, médio e grande), conforme apresentado nos cenários do capítulo 5.

Todos os cenários foram simulados para orientação norte-sul, pois, conforme verificado na Tabela 14, quando considerado o sombreamento externo de forma eficiente, a diferença de ganhos de calor provenientes da radiação solar entre as orientações norte-sul e leste-oeste não é tão significativa. Adicionalmente, de acordo com Cotta (2012), a orientação norte-sul apresenta maior potencial de alcançar níveis mais elevados de luz natural em virtude da tipologia dos sistemas de sombreamento, oferecendo assim oportunidade para a redução dos ganhos de calor provenientes de iluminação artificial. Desse modo, a adoção desta orientação para as simulações de planta retangular está sendo coerente com a proposta da tese de focar nos cenários que têm o potencial de fornecer uma melhor condição de desempenho ambiental.

O cenário com átrios grandes de 12 pavimentos (cenário 1 da Tabela 15) apresentou o melhor resultado entre todas as simulações para a tipologia de átrios periféricos, com 126 horas de superaquecimento (acima de 28°C) no pavimento mais baixo, 181 no pavimento mais alto e 191 no pavimento intermediário mais quente. Estes resultados representam uma redução de 75,13% a 83,60% (dependendo do pavimento) no número de horas de superaquecimento em relação ao caso-base na orientação norte-sul. Já para orientação leste-oeste, a redução esteve entre 80% (no pavimento intermediário mais quente) e 86,79% (no pavimento mais baixo). Considerando 26°C como limite de aceitação térmica, obteve-se 528 horas no pavimento mais baixo, 651 no pavimento mais alto e 708 no pavimento intermediário mais quente.

De forma comparativa, verificou-se que o número de horas de superaquecimento foi maior neste caso (cenário 1 da Tabela 15) que no mesmo cenário da tipologia de planta quadrada, apresentando um aumento de 13,5% no pavimento mais baixo e 5,5% nos pavimentos mais alto e intermediário mais quente. Essa piora no desempenho térmico se deve principalmente à redução nas taxas de ventilação que são em média 13% menores no cenário de planta retangular. Nos pavimentos mais baixo e mais alto, as taxas de ventilação foram de 18,37 TAH e 18,49

TAH respectivamente, em contraste com a taxa de 8,39 TAH no pavimento intermediário mais quente. Uma possível explicação para essa redução nas taxas de ventilação é que o núcleo de serviços na planta retangular, por ter formato alongado, cria uma obstrução na área central da planta impedindo que o fluxo de ar se distribua na planta de forma mais homogênea, formando uma área com pouca ventilação e maior probabilidade de apresentar temperaturas mais elevadas. Este efeito é minimizado nos cenários de planta quadrada, pois o núcleo é quadrado (e não alongado) e, assim, possibilita a ventilação cruzada com as fachadas adjacentes.

O cenário de pior desempenho foi o de átrios pequenos com 6 pavimentos, que apresentou 156 horas anuais de desconforto no pavimento mais baixo (acima de 28°C), 241 no pavimento mais elevado e 278 horas no pavimento intermediário mais quente. Quando considerado 26°C como o limite aceitável para as temperaturas internas, as horas de superaquecimento sobem para 614 no pavimento mais baixo, 822 no pavimento mais alto e 846 no pavimento intermediário mais quente. As taxas de ventilação neste cenário também foram significativamente menores que no cenário de átrios grandes com 12 pavimentos, com 10,31 TAH no pavimento mais baixo, 10,50 TAH no pavimento mais alto e 6,05 TAH no pavimento intermediário mais quente.

Com relação ao mapeamento das horas de superaquecimento ao longo do ano, verifica-se na Tabela 17 que, quando considerado 28°C como limite máximo aceitável de temperatura nos ambientes internos, nos meses entre abril e novembro (2/3 do ano), é possível operar 100% do tempo com ventilação natural (no melhor cenário da tipologia de átrios periféricos grandes). Nos demais meses o modo misto é recomendado. Considerando 26°C como limite de aceitação térmica, verifica-se que apenas nos meses de junho e julho não houve horas de superaquecimento, no entanto nos meses de abril, maio, agosto, setembro, outubro e novembro notou-se desconforto térmico em menos de 30 horas mensais, valor significativamente baixo, que também não justifica a utilização de sistema ativo de climatização.

Tabela 17. Horas de superaquecimento por mês para o cenário com átrios periféricos grandes de 12 pavimentos (pavimento mais baixo).

Átrios periféricos grandes com 12 pavimentos		
Meses	Horas acima de 28°C	Horas acima de 26°C
Janeiro	46	147
Fevereiro	15	86
Março	26	105
Abril	0	29
Maio	0	8
Junho	0	0
Julho	0	0
Agosto	0	13
Setembro	1	18
Outubro	6	17
Novembro	9	25
Dezembro	23	80

Em relação às cargas de resfriamento, o melhor cenário foi o de átrios grandes com 12 pavimentos, cuja carga anual de resfriamento para o pavimento mais baixo foi de 9,78 kWh/m², 12,06 kWh/m² para o andar mais elevado e 13,11 kWh/m² para o pavimento intermediário mais quente. Isso demonstra uma redução média de 79,6 kWh/m² ao ano em relação ao caso-base na orientação norte-sul e de 97,98 kWh/m² em relação ao caso-base na orientação leste-oeste.

Desse modo, se considerarmos um prédio de 36 pavimentos, podemos tecer a seguinte análise referente à economia de energia em relação ao caso-base na orientação norte-sul:

- Área útil do pavimento tipo: 1.600 m² x 36 pavimentos = 57.600,00 m² (área útil total do edifício);
- 79,6 kWh/m² x 57.600,00 = 4.584.960,00 kWh / 6,419 (COP) = 714.279,48 kWh (total de energia que deixou de ser consumida para fins de climatização em um ano de operação do edifício);

- $4.584.960,00 \text{ kWh} \times \text{R\$ } 0,65 = \text{R\$ } 464.281,66,00$ (quatrocentos e sessenta e quatro mil e duzentos e oitenta e um reais).

Em relação ao caso-base na orientação leste-oeste a redução seria de:

- $97,98 \text{ kWh/m}^2 \times 57.600,00 = 5.643.648,00 \text{ kWh} / 6,419 \text{ (COP)} = 849.209,84 \text{ kWh}$
- $849.209,84 \text{ kWh} \times \text{R\$ } 0,65 = \text{R\$ } 571.486,39$ (quinhentos e setenta e um mil e quatrocentos e oitenta e seis reais).

Tabela 18. Átrios adjacentes ao núcleo com 12 pavimentos.

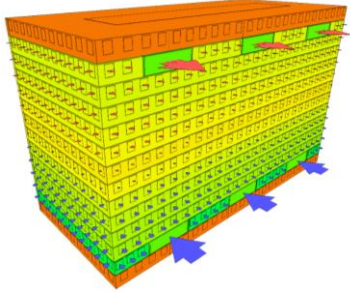
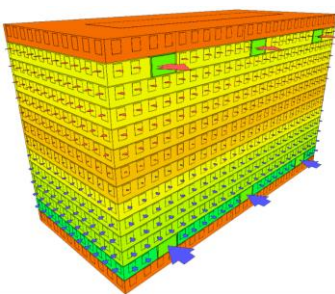
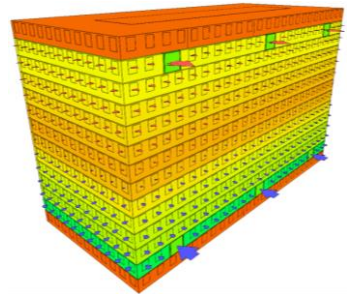
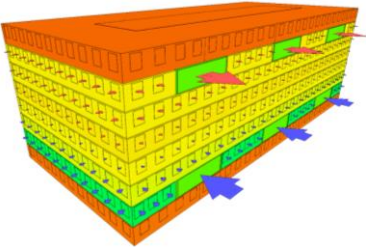
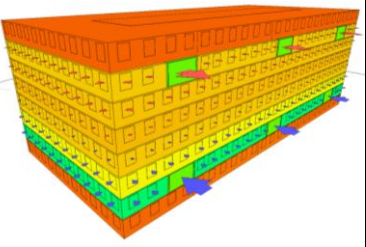
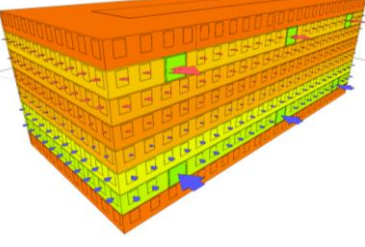
Átrios Adjacentes ao Núcleo com 12 Pavimentos	1. Átrio Grande	2. Átrio Médio	3. Átrio Pequeno
			
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais baixo	94	99	106
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais alto	135	152	160
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento intermediário mais quente	153	174	177
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais baixo	479	504	511
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais alto	593	625	644
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento intermediário mais quente	614	679	703
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais baixo	21,17	18,49	17,87
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais alto	21,43	18,88	17,88
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento intermediário mais quente	11,16	8,44	7,71
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais baixo	8,87	9,33	9,46
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais alto	10,98	11,58	11,93
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento intermediário mais quente	11,37	12,58	13,02



Tabela 19. Átrios adjacentes ao núcleo com 6 pavimentos.

Átrios Adjacentes ao Núcleo com 6 Pavimentos	1. Átrio Grande	2. Átrio Médio	3. Átrio Pequeno
			
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais baixo	109	114	122
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais alto	160	172	178
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento intermediário mais quente	177	186	192
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais baixo	527	531	538
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais alto	593	701	717
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento intermediário mais quente	650	693	722
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais baixo	15,97	13,75	11,33
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais alto	15,49	13,81	11,66
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento intermediário mais quente	10,32	7,81	7,13
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais baixo	9,76	9,84	9,97
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais alto	10,98	12,98	13,28
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento intermediário mais quente	12,04	12,84	13,37



As tabelas 18 e 19 apresentam simulações de um edifício de planta retangular, com átrios adjacentes ao núcleo de serviços interligando 6 e 12 pavimentos. Assim como nos cenários apresentados anteriormente, a entrada de ar nos átrios se dá pelo pavimento mais baixo e a saída pelo pavimento mais alto, tirando assim máximo proveito da altura para impulsionar a ventilação por efeito chaminé. Além da variação na quantidade de pavimentos dos átrios, foram simuladas três dimensões de vazios (pequeno, médio e grande), conforme apresentado nos cenários do capítulo 5.

O cenário 1 da tabela 18, que contém átrios grandes com 12 pavimentos, apresentou o melhor resultado entre todos os cenários simulados para a tipologia de átrios adjacentes ao núcleo, com apenas 94 horas de superaquecimento (acima de 28°C) no pavimento mais baixo, 135 no pavimento mais alto e 153 no pavimento intermediário mais quente, o que representa uma redução de 19,89% a 25,41% (dependendo do pavimento) em relação ao melhor cenário da tipologia de átrios periféricos. Em relação ao caso-base orientado para norte-sul (sem sombreamento e sem vento externo), essa redução é de 87,76% para o pavimento mais baixo e 80,07% para o pavimento mais quente. Em comparação com o caso-base orientado para leste-oeste, a redução chega a 90,14% no pavimento mais baixo e 83,96% no pavimento intermediário mais quente. As taxas médias de ventilação em uma semana típica de verão aumentaram em média 15% em relação ao cenário 1 da tabela 15 e chegaram a 21,17 TAH, mas ainda ficaram bem abaixo dos 27,50 TAH alcançados em cenário semelhante no edifício de planta quadrada. A hipótese apresentada para explicar a redução nas taxas de ventilação dos cenários de átrios periféricos em planta retangular, em comparação com a mesma tipologia de átrios em planta quadrada, também se aplica neste caso, pois entende-se que o formato alongado do núcleo de serviços também prejudica a distribuição mais homogênea do fluxo de ar na planta do pavimento.

Considerando 26°C como limite de aceitação térmica, obteve-se 479 horas no pavimento mais baixo, 593 no pavimento mais alto e 614 no pavimento intermediário mais quente.

Assim como na tipologia de átrios periféricos, o cenário de pior desempenho foi o de átrios pequenos com 6 pavimentos, que apresentou 122 horas anuais de desconforto no pavimento mais baixo (acima de 28°C), 178 no pavimento mais elevado e 192 horas no pavimento intermediário mais quente. Vale ressaltar que

houve uma redução de 21,79% no pavimento baixo em comparação com o mesmo cenário na tipologia de átrios periféricos. No pavimento mais alto e intermediário mais quente as reduções foram de 26,14% e 30,93%, respectivamente. Quando considerado 26°C como o limite aceitável para as temperaturas internas, as horas de superaquecimento sobem para 538 no pavimento mais baixo, 717 no pavimento mais alto e 722 no pavimento intermediário mais quente. As taxas de ventilação neste cenário também foram significativamente menores do que no cenário de átrios grandes com 12 pavimentos, com 11,33 TAH no pavimento mais baixo, 11,66 TAH no pavimento mais alto e 7,13 TAH no pavimento intermediário mais quente.

Com relação ao mapeamento das horas de superaquecimento ao longo do ano, verifica-se na tabela 20 que o mês que apresentou maior número de horas de superaquecimento foi janeiro, com 42 horas e 145 horas para limites de aceitação térmica de 28°C e 26°C, respectivamente. Os meses de abril a setembro não tiveram horas de superaquecimento acima de 28°C e nos meses de outubro e novembro, as quantidades de horas podem ser consideradas desprezíveis (duas horas em cada mês).

Tabela 20. Horas de superaquecimento por mês para o cenário com átrios grandes adjacentes ao núcleo com 12 pavimentos (pavimento mais baixo).

Átrios grandes adjacentes ao núcleo com 12 pavimentos		
Meses	Horas acima de 28°C	Horas acima de 26°C
Janeiro	42	145
Fevereiro	10	78
Março	23	94
Abril	0	28
Maio	0	3
Junho	0	0
Julho	0	0
Agosto	0	9
Setembro	0	13
Outubro	2	17
Novembro	2	19
Dezembro	15	73

Em consequência do bom desempenho térmico, o cenário de átrios grandes com 12 pavimentos foi o que apresentou as menores cargas anuais de resfriamento: 8,87 kWh/m² no pavimento mais baixo, 10,98 kWh/m² no andar mais elevado e 11,37 kWh/m² no pavimento intermediário mais quente. Isso demonstra uma redução média de 80,85 kWh/m² ao ano em relação ao caso-base na orientação norte-sul e de 99,23 kWh/m² em relação ao caso-base na orientação leste-oeste.

Desse modo, se considerarmos um prédio de 36 pavimentos, podemos tecer a seguinte análise referente à economia de energia em relação ao caso-base na orientação norte-sul:

- Área útil do pavimento tipo: 1.600 m² x 36 pavimentos = 57.600,00 m² (área útil total do edifício);
- 80,85 kWh/m² x 57.600,00 = 4.656.960,00 kWh / 6,419 (COP) = 725.496,18 kWh (total de energia que deixou de ser consumida para fins de climatização em um ano de operação do edifício);
725.496,18 kWh x R\$ 0,65 = **R\$ 471.572,51** (quatrocentos e setenta e um mil e quinhentos e setenta e dois reais).

Em relação ao caso-base na orientação leste-oeste a redução seria de:

- 99,23 kWh/m² x 57.600,00 = 5.715.648,00 kWh / 6,419 (COP) = 890.426,54 kWh
- 890.426,54 kWh x R\$ 0,65 = **R\$ 578.777,25** (quinhentos e setenta oito mil e setecentos e setenta e sete reais).

Tabela 21. Átrios centrais com 12 pavimentos.

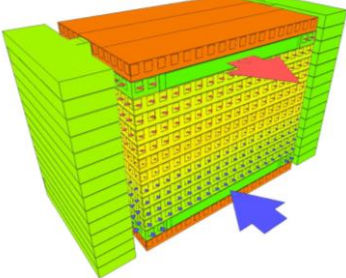
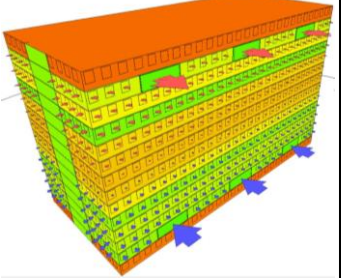
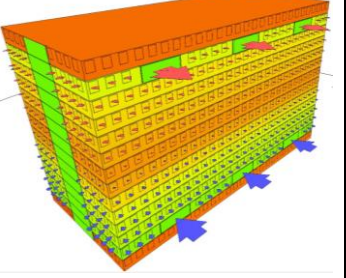
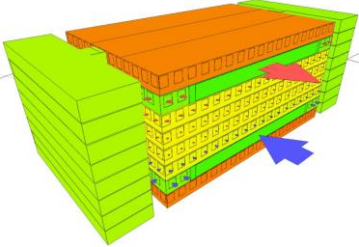
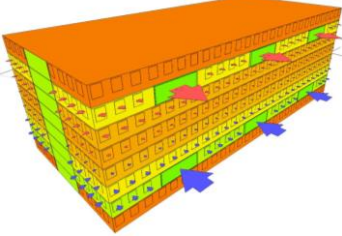
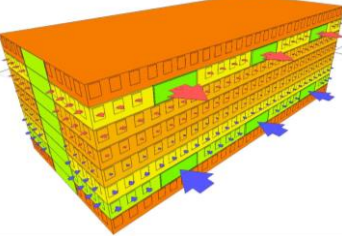
Átrios Centrais (Cenário Propositivo) com 12 Pavimentos	1. Átrio Grande	2. Átrio Médio	3. Átrio Pequeno
			
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais baixo	91	97	103
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais alto	130	139	151
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento intermediário mais quente	149	162	176
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais baixo	465	494	490
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais alto	567	587	638
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento intermediário mais quente	611	676	730
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais baixo	22,4	21,17	19,02
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais alto	22,73	21,93	18,79
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento intermediário mais quente	12,41	9,85	7,53
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais baixo	8,61	9,15	9,08
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais alto	10,50	10,87	11,82
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento intermediário mais quente	11,32	12,52	13,52



Tabela 22. Átrios centrais com 6 pavimentos.

Átrios Centrais (Cenário Propositivo) com 6 Pavimentos	1. Átrio Grande	2. Átrio Médio	3. Átrio Pequeno
			
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais baixo	117	130	139
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento mais alto	170	184	195
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 28 °C - Pavimento intermediário mais quente	187	199	216
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais baixo	540	589	612
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento mais alto	616	719	746
Horas Anuais de Superaquecimento acima de 26 °C - Pavimento intermediário mais quente	643	723	765
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais baixo	13,08	12,46	9,57
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento mais alto	14,49	12,97	9,97
Taxa Média de Ventilação por Hora em uma semana Típica de Verão (TAH) - Pavimento intermediário mais quente	10,87	7,42	6,57
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais baixo	10,00	10,91	11,34
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento mais alto	11,41	13,32	13,82
Cargas de Resfriamento - acima de 26°C (kWh/m²/ano) - Pavimento intermediário mais quente	11,91	13,39	14,17



As tabelas 21 e 22 apresentam simulações de um edifício de planta retangular, com átrios localizados no centro da planta, interligando 6 e 12 pavimentos. Conforme mencionado anteriormente, essa conformação de planta só é possível em um cenário propositivo, em contraste com os cenários anteriormente apresentados, que são viáveis em casos de *retrofit*. Assim como nos demais cenários, a entrada de ar nos átrios se dá pelo pavimento mais baixo e a saída pelo pavimento mais alto. Foram simuladas três dimensões de vazios centrais (pequeno, médio e grande) e átrios com 6 e 12 pavimentos. Nesta sequência de simulações, assim como nos cenários apresentados anteriormente, também se nota o fenômeno da estratificação térmica elevando as temperaturas nos pavimentos mais altos.

O cenário 1 da tabela 21, que contém átrios grandes com 12 pavimentos, apresentou o melhor resultado entre todos os cenários simulados para a tipologia de átrios centrais, com 91 horas de superaquecimento (acima de 28°C) no pavimento mais baixo, 130 no pavimento mais alto e 149 no pavimento intermediário mais quente. Este resultado é positivo pois, diferentemente do edifício de planta quadrada, neste caso o cenário propositivo apresentou um desempenho térmico superior aos outros dois cenários de planta retangular. Um dos fatores que explica essa melhoria de desempenho é a posição dos núcleos de serviço, que, em virtude da grande dimensão dos átrios internos, precisou ser alocado nas laterais da planta, deixando o layout desobstruído para ventilação cruzada, conforme demonstrado na Figura 111. Vale ressaltar também que este cenário apresentou uma redução de 80,59% a 89,4% (no pavimento intermediário mais quente e no pavimento mais baixo, respectivamente) em relação ao caso-base na orientação norte-sul. Já na orientação leste-oeste a redução foi de 84,38% e 90,46% (no pavimento intermediário mais quente e no pavimento mais baixo, respectivamente).

As taxas médias de ventilação em uma semana típica de verão são em média 7,81% maiores que no cenário com átrios adjacentes ao núcleo. Nos pavimentos mais baixo e mais alto, as taxas de ventilação foram de 22,40 TAH e 22,73 TAH respectivamente, em contraste com a taxa de 12,41 TAH no pavimento intermediário mais quente. Considerando 26°C como limite de aceitação térmica, obteve-se 465 horas no pavimento mais baixo, 567 no pavimento mais alto e 611 no pavimento intermediário mais quente.

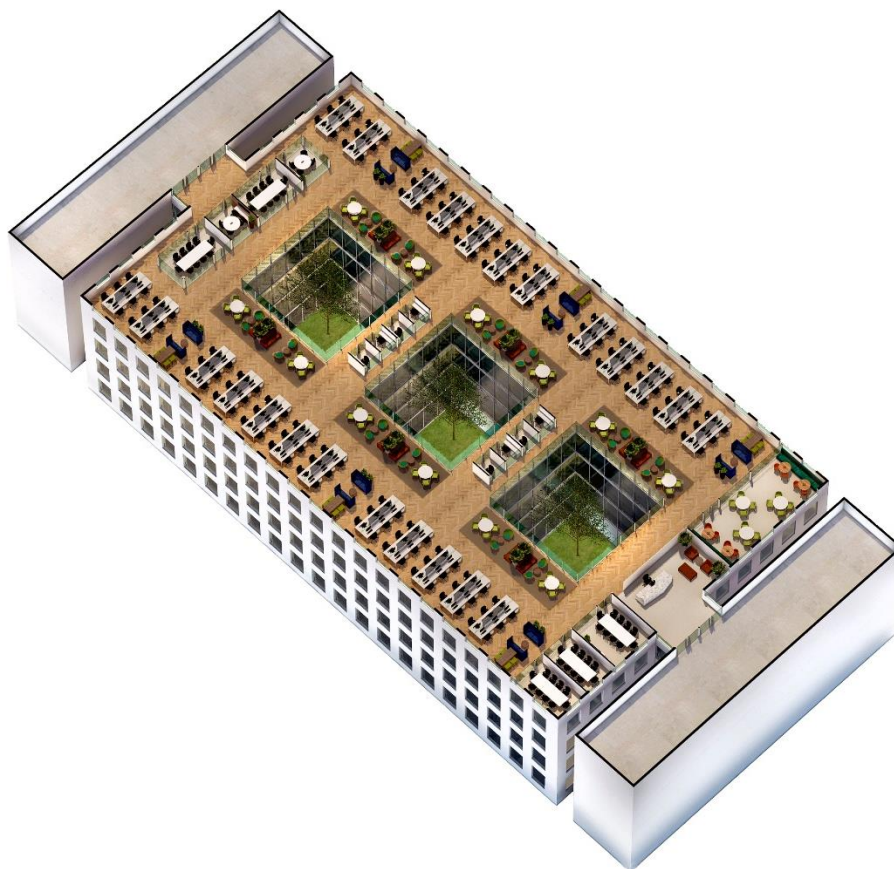


Figura 111. Posição dos núcleos de serviço, com relação aos átrios internos.

Fonte: Autor da tese.

Assim como nas demais tipologias de átrio, o cenário de pior desempenho foi o átrio pequeno com 6 pavimentos, que apresentou 139 horas anuais de desconforto no pavimento mais baixo (acima de 28°C), 195 no pavimento mais elevado e 216 horas no pavimento intermediário mais quente. Quando considerado 26°C como o limite aceitável para as temperaturas internas, as horas de superaquecimento sobem para 612 no pavimento mais baixo, 746 no pavimento mais alto e 765 no pavimento intermediário mais quente. As taxas de ventilação neste cenário também foram significativamente menores que no cenário de átrios grandes com 12 pavimentos, com 9,57 TAH no pavimento mais baixo, 9,97 TAH no pavimento mais alto e 6,57 TAH no pavimento intermediário mais quente.

Com relação ao mapeamento das horas de superaquecimento ao longo do ano, verifica-se na tabela 23 que o mês que apresentou maior número de horas de superaquecimento foi janeiro, com 38 horas e 139 horas, para limites de aceitação térmica de 28°C e 26°C , respectivamente. Os meses de abril a setembro não tiveram

horas de superaquecimento acima de 28°C e nos meses de outubro e novembro, as quantidades de horas podem ser consideradas desprezíveis (uma e duas horas em cada mês).

Tabela 23. Horas de superaquecimento por mês para o cenário com átrios grandes centrais ao núcleo com 12 pavimentos (pavimento mais baixo).

Átrios grandes centrais ao núcleo com 12 pavimentos		
Meses	Horas acima de 28°C	Horas acima de 26°C
Janeiro	38	139
Fevereiro	11	76
Março	25	91
Abril	0	25
Maio	0	3
Junho	0	0
Julho	0	0
Agosto	0	8
Setembro	0	14
Outubro	1	17
Novembro	2	21
Dezembro	14	71

Assim como nas demais tipologias de átrios, o cenário com átrios grandes de 12 pavimentos foi o que apresentou as menores cargas anuais de resfriamento: 8,61 kWh/m² no pavimento mais baixo, 10,50 kWh/m² no andar mais elevado e 11,32 kWh/m² no pavimento intermediário mais quente. Isso demonstra uma redução média de 81,11 kWh/m² ao ano em relação ao caso-base na orientação norte-sul e de 99,49 kWh/m² em relação ao caso-base na orientação leste-oeste.

Desse modo, se considerarmos um prédio de 36 pavimentos, podemos tecer a seguinte análise referente à economia de energia em relação ao caso-base na orientação norte-sul:

- Área útil do pavimento tipo: $1.600 \text{ m}^2 \times 36 \text{ pavimentos} = 57.600,00 \text{ m}^2$ (área útil total do edifício);
- $81,11 \text{ kWh/m}^2 \times 57.600,00 = 4.671.936,00 \text{ kWh} / 6,419 \text{ (COP)} = 727.829,25 \text{ kWh}$ (total de energia que deixou de ser consumida para fins de climatização em um ano de operação do edifício);
- $727.829,25 \text{ kWh} \times \text{R\$ } 0,65 = \text{R\$ } 473.089,01$ (quatrocentos e setenta e três mil e oitenta e nove reais).

Em relação ao caso-base na orientação leste-oeste a redução seria de:

- $99,49 \text{ kWh/m}^2 \times 57.600,00 = 5.730.624,00 \text{ kWh} / 6,419 \text{ (COP)} = 892.759,61 \text{ kWh}$.
- $892.759,61 \text{ kWh} \times \text{R\$ } 0,65 = \text{R\$ } 580.293,74$ (quinhentos e oitenta mil e duzentos e noventa e três reais).

6.3 CLASSIFICAÇÃO GERAL DE DESEMPENHO: *térmica e ventilação*

Nesta seção do capítulo 6, será apresentada uma classificação, organizando de forma hierárquica os cenários que apresentaram os melhores desempenhos térmicos. De forma a sintetizar a análise dos resultados, foi adotado como critério de comparação utilizar como base o pavimento de melhor desempenho em cada um dos cenários. Vale ressaltar que, em todos os casos, o pavimento mais baixo foi o que apresentou o melhor desempenho térmico e nos pavimentos superiores as temperaturas internas foram levemente mais elevadas em razão do fenômeno da estratificação térmica.

Adicionalmente, foi incluída uma coluna demonstrando também as maiores taxas de ventilação obtidas em cada cenário de análise. Essa coluna fornece uma base de comparação entre o desempenho térmico e o potencial de ventilação natural.

Tabela 24. Classificação de desempenho térmico comparando os 36 cenários simulados; as cores azul, verde e laranja representam as seguintes tipologias de átrios (respectivamente): átrio adjacente ao núcleo, átrio central e átrio periférico.

CLASSIFICAÇÃO GERAL DE DESEMPENHO: térmica e ventilação			
	Forma de Planta e Tipologia de Átrio	Menor quantidade de horas de superaquecimento obtidas em um pavimento (acima de 28 C)	Melhores taxas de ventilação obtidas
1	Planta Quadrada - Átrio Adjacente Grande - 12 pavimentos	88	27,68
2	Planta Retangular - Átrio Central Grande - 12 pavimentos	91	23,01
3	Planta Quadrada - Átrio Adjacente Médio - 12 pavimentos	91	24,06
4	Planta Retangular - Átrio Adjacente Grande - 12 pavimentos	94	21,43
5	Planta Quadrada - Átrio Adjacente Pequeno - 12 Pavimentos	95	21,12
6	Planta Retangular - Átrio Central Médio - 12 pavimentos	97	21,93
7	Planta Quadrada - Átrio Adjacente Grande - 6 Pavimentos	98	19,49
8	Planta Quadrada - Átrio Central Grande - 12 pavimentos	99	21,03
9	Planta Retangular - Átrio Adjacente Médio - 12 pavimentos	99	18,88
10	Planta Retangular - Átrio Central Pequeno - 12 pavimentos	103	19,02
11	Planta Retangular - Átrio Adjacente Pequeno - 12 pavimentos	106	17,88
12	Planta Quadrada - Átrio Central Médio - 12 pavimentos	106	18,66
13	Planta Retangular - Átrio Adjacente Grande - 6 pavimentos	109	15,97
14	Planta Quadrada - Átrio Periférico Grande - 12 pavimentos	111	21,53
15	Planta Quadrada - Átrio Central Pequeno - 12 pavimentos	112	16,98
16	Planta Quadrada - Átrio Adjacente Médio - 6 pavimentos	112	15,58
17	Planta Retangular - Átrio Adjacente Médio - 6 pavimentos	114	13,81
18	Planta Retangular - Átrio Central Grande - 6 pavimentos	117	14,49

19	Planta Quadrada - Átrio Adjacente Pequeno - 6 pavimentos	117	12,85
20	Planta Quadrada - Átrio Periférico Médio - 12 pavimentos	118	18,67
21	Planta Retangular - Átrio Adjacente Pequeno - 6 pavimentos	122	11,66
22	Planta Retangular - Átrio Periférico Grande - 12 pavimentos	126	18,49
23	Planta Retangular - Átrio Periférico Médio - 12 pavimentos	130	16,79
24	Planta Retangular - Átrio Central Médio - 6 pavimentos	130	12,97
25	Planta Quadrada - Átrio Periférico Grande - 6 pavimentos	132	16,59
26	Planta Quadrada - Átrio Periférico Pequeno - 12 pavimentos	133	14,68
27	Planta Quadrada - Átrio Central Grande - 6 pavimentos	133	11,97
28	Planta Retangular - Átrio Periférico Grande - 6 pavimentos	135	14,79
29	Planta Retangular - Átrio Periférico Pequeno - 12 pavimentos	139	14,64
30	Planta Retangular - Átrio Central Pequeno - 6 pavimentos	139	9,97
31	Planta Quadrada - Átrio Periférico Médio - 6 pavimentos	141	13,89
32	Planta Quadrada - Átrio Central Médio - 6 pavimentos	142	9,88
33	Planta Retangular - Átrio Periférico Médio - 6 pavimentos	148	12,83
34	Planta Quadrada - Átrio Central Pequeno - 6 pavimentos	149	8,65
35	Planta Retangular - Átrio Periférico Pequeno - 6 pavimentos	156	10,5
36	Planta Quadrada - Átrio Periférico Pequeno - 6 pavimentos	161	9,05

Após análise da tabela 24, é possível tecer as seguintes conclusões:

- A tipologia de átrios adjacentes esteve em quatro posições entre as cinco primeiras posições da classificação.
- Analisando as 18 primeiras posições da tabela, que representam metade dos cenários simulados, a tipologia de átrios adjacentes ocupou 10 posições, a tipologia de átrios centrais ocupou 7 posições e a tipologia de átrios periféricos ocupou apenas uma posição.
- Os átrios periféricos tiveram o pior desempenho entre as três tipologias analisadas. O melhor cenário da tipologia de átrio periférico está na décima quarta posição e a partir da vigésima posição, essa tipologia foi a que teve maior ocorrência (68,75%). Uma das possíveis explicações para este fenômeno diz respeito à posição do átrio em relação à planta. Conforme explicado anteriormente, as simulações foram desenvolvidas com base nos modelos de referência, criados a partir das características de projeto de maior ocorrência no segmento de prédios corporativos da cidade de São Paulo. Nesses projetos, normalmente a planta não cumpre com os requisitos mínimos de profundidade para ventilação e iluminação naturais (CIBSE, 2005), configurando assim uma planta profunda. Desse modo, ao localizar os átrios (que impulsionam a ventilação) na área periférica da planta, a região que está mais próxima do núcleo não recebe ventilação adequada para remover os ganhos de calor provenientes de ocupação. Essa condição é ainda mais agravada no cenário com planta retangular, na qual o núcleo conta com formato alongado, criando uma barreira ainda maior para que o ar flua e exerça ventilação cruzada com as fachadas opostas e adjacentes.
- A tipologia de átrios adjacentes apresentou os melhores resultados tanto para os cenários com 12 pavimentos como para os cenários com 6 pavimentos. Isso ocorreu porque a posição do átrio de forma adjacente ao núcleo contribui para reduzir a profundidade da planta, facilitando com que os ganhos de calor interno sejam removidos com mais facilidade. Ademais, a posição dos vazios permite que a ventilação cruzada ocorra sem obstruções, entre o átrio e a

fachada externa. Vale notar que, nessa tipologia de átrios, foram alcançadas as maiores taxas de ventilação entre todos os cenários. Nota-se também que essa ventilação é mais potencializada na planta quadrada, que ocupa a primeira e a terceira posição da tabela. A maior taxa de ventilação alcançada para todos os cenários foi de 27,68 TAH.

- Comparando as taxas de ventilação entre os cenários de mesma tipologia de átrio, nota-se que existe uma relação de proporcionalidade, pela qual os cenários com maiores taxas de ventilação oferecem melhor desempenho térmico. No entanto, ao comparar cenários com tipologias distintas de átrios, verifica-se que existem casos em que são alcançados melhores desempenhos térmicos com taxas menores de ventilação. Isso ocorre porque a taxa de ventilação não é o único fator que influencia o desempenho térmico dos pavimentos. Cada cenário, de acordo com a forma do prédio e com a tipologia de átrio nele contida, está submetido a uma gama de fatores que podem influenciar na térmica, e entre eles estão: ganhos de calor provenientes de radiação solar (mesmo com sombreamento, cada forma de prédio tem um comportamento) e as perdas de calor na envoltória por condução e convecção.
- Em relação à ventilação, nota-se que, de forma geral, quanto maior a altura do átrio, maiores são as taxas de ventilação e proporcionalmente melhor o desempenho térmico. Na maior parte dos casos, os átrios de 12 pavimentos desempenharam melhor que os átrios de 6 pavimentos, quando comparados átrios de mesma tipologia. Outro aspecto que também influencia na taxa de ventilação é a dimensão do átrio. Foi verificado que os átrios de maiores dimensões, de maneira geral, têm condição de ofertar maior potencial de ventilação natural por efeito chaminé.
- Outro aspecto interessante a ser ressaltado é que, embora esta categorização classifique de forma hierárquica os cenários, ao comparar as variações térmicas entre átrios de mesma dimensão, mas com tipologias diferentes, verifica-se que a diferença entre eles não é tão significativa. Por exemplo, o cenário de melhor desempenho da tipologia de átrios adjacentes teve 88 horas

de superaquecimento (acima de 28°C) no pavimento de melhor desempenho e ocupou a primeira posição na classificação. Já o cenário de melhor desempenho da tipologia de átrios periféricos, teve 111 horas de superaquecimento e ocupou a decima quarta posição na classificação. Existe uma diferença entre os dois cenários de 23 horas/ano. Após as análises realizadas no gráfico da Figura 108, sabe-se que, em uma semana típica de verão, essas horas de superaquecimento podem ocorrer em um período médio de seis horas por dia.

Desse modo, é possível fazer uma comparação de que essas 23 horas a mais de superaquecimento no cenário de átrios periféricos poderiam resultar em quatro dias a mais com temperaturas acima de 28°C, em todo o ano. Estes valores não são expressivos para operação, considerando ainda que o edifício que está sendo proposto deve operar em modo misto. Assim sendo, conclui-se que a classificação de térmica não deve ser o único parâmetro de escolha para a melhor tipologia de átrio a ser inserida no projeto de um edifício de escritórios em São Paulo. Deve-se verificar, também, qual dos cenários tem melhores condições de ofertar níveis mais satisfatórios de luz natural e qual tipologia de átrio permite maior flexibilidade e adaptabilidade com relação a layout e ocupação espacial.

Considerações Finais

SÍNTESE DOS CAPÍTULOS

O presente trabalho teve como objeto de estudo a utilização de átrios e vazios arquitetônicos para o aprimoramento das estratégias de ventilação natural por efeito chaminé no contexto dos edifícios de escritório em São Paulo. Portanto a relação entre a ventilação natural e os espaços de trabalho foi a linha guia de toda a discussão apresentada nesta tese.

A introdução abordou questões relativas ao pobre desempenho ambiental dos edifícios de escritório em caixa de vidro e a como o desenvolvimento de tecnologias e sistemas prediais exerceu uma grande influência na abordagem metodológica de projetos arquitetônicos. A dependência dos sistemas de iluminação e condicionamento artificiais durante todo o ano para alcançar o conforto dos usuários gera um impacto negativo no meio ambiente, representando aproximadamente 25% do consumo de energia primária global. No contexto nacional, São Paulo é a cidade que possui a maior concentração de edifícios de escritório, o que torna ainda mais relevante uma revisão crítica relacionada a construção e operação dessas edificações, avaliando quais as potenciais soluções para se obter melhor interação entre o edifício, o usuário e o clima.

Na conclusão da introdução é realizado um breve histórico da evolução dos ambientes de trabalho (no nível de layout e concepção espacial interna) e de como esse processo de mudança de conceitos e padrões de trabalho refletiu diretamente na forma como as pessoas utilizam os espaços. Verificou-se que o tipo de trabalho desenvolvido atualmente, baseado em colaboração, criatividade e inovação, permite maior flexibilidade de layout e de ocupação. Desse modo, espaços diversificados como varandas, átrios e jardins estão sendo mais valorizados, além de ter o potencial de proporcionar melhor qualidade ambiental ao edifício.

O capítulo 1 realizou uma revisão dos principais fenômenos físicos que dizem respeito a estratégias e fundamentos da ventilação natural, primeiramente em um contexto macro, abrangendo a escala urbana, e posteriormente em um contexto mais focado nos edifícios de escritório multipavimentos. A pesquisa demonstrou como a diferença de pressão estática pode impulsionar o movimento de ar em átrios e vazios,

tendo como principais fatores de influência a diferença de temperatura e a altura do(s) átrio(s).

Adicionalmente, foi realizada uma revisão dos principais conceitos relacionados às teorias de conforto térmico (equilíbrio de calor e modelo adaptativo), de modo a comparar as limitações e aplicações de cada modelo, embasando tecnicamente os critérios de análise dos estudos analíticos. Em síntese, o modelo adaptativo aumenta significativamente a aceitação por parte dos usuários em relação a variações de temperatura internas, que são características comuns em edifícios ventilados naturalmente.

O capítulo 2 focou na análise técnica de dois precedentes (edifício sede do Commerzbank, em Frankfurt, e edifício 30th St. Mary Axe, em Londres), que aplicaram de forma bem-sucedida os conceitos físicos da ventilação natural, utilizando átrios para impulsionar a ventilação por efeito chaminé.

A revisão crítica do desempenho ambiental desses edifícios possibilitou um entendimento mais abrangente referente à aplicação dos conceitos físicos, de forma prática, no processo de projeto, que se refletem também em questões técnicas da operação do edifício e no comportamento dos usuários. Vale ressaltar que, entre os dois edifícios analisados, o Commerzbank possibilitou uma análise mais detalhada, já que ele opera a maior parte do ano com ventilação natural e já foi objeto de pesquisas de campo que puderam verificar em detalhes o funcionamento das estratégias de projeto. Já o edifício 30th St. Mary Axe foi projetado para utilizar a ventilação natural, mas atualmente opera durante todo o ano utilizando sistemas ativos de condicionamento de ar. De todo modo, ambos os precedentes serviram de referência para criar os modelos alternativos das simulações computacionais (estudos analíticos).

O capítulo 3 focou na pesquisa de campo realizada no edifício de escritórios Torre Cube, localizado na cidade de Guadalajara, no México, que foi escolhido para ser analisado como estudo de caso, por se tratar de um dos poucos exemplos de prédios de escritório multipavimentos (localizado em cidade de clima quente) a operar durante a maior parte do ano utilizando ventilação natural. Entre suas principais características, o edifício conta com um átrio central que possibilita um sistema de ventilação que combina efeito chaminé com ventilação cruzada. Adicionalmente,

todas as fachadas expostas são sombreadas e alguns pavimentos contam com varandas/terraços laterais que são espaços de transição para os usuários. Como parte da pesquisa foram instalados data loggers que fizeram medições de temperatura ao longo de uma semana e, em paralelo, foram realizadas entrevistas com os usuários, para entender quais as principais questões relacionadas à operação do edifício. Com base na pesquisa foi possível reunir algumas lições aprendidas, que evidenciaram cuidados que se deve ter no projeto da envoltória e dos espaços de transição de edifícios ventilados naturalmente.

O capítulo 4 contemplou inicialmente uma análise do clima de São Paulo, enfatizando a importância da ventilação natural e do sombreamento de fachadas para alcançar conforto térmico por meios passivos. De forma complementar, o capítulo retratou também uma pesquisa de campo realizada por Cotta (2012), em um edifício ventilado naturalmente em Jundiaí-SP, no qual foram encontrados problemas similares aos verificados na pesquisa da Torre Cube, relacionados a velocidades de ar muito acentuadas nas estações de trabalho próximas das janelas e sistema de sombreamento ineficiente. Além disso, um aspecto importante observado nesse caso foi a falta de aberturas para entrada e saída de ar nos pavimentos mais baixos e mais altos do átrio central, impactando negativamente no potencial de ventilação de todo o prédio. Estas questões auxiliaram a direcionar as propostas de projeto para os diversos cenários simulados nos estudos analíticos, buscando evitar estratégias de projeto que não se demonstraram efetivas na prática.

Ademais, foram apresentados estudos analíticos realizados por Cotta (2012) que quantificaram o impacto dos dispositivos de sombreamento na redução da radiação solar direta e difusa incidente em cada uma das orientações (leste, oeste, norte e sul), demonstrando quais as tipologias de proteção solar mais adequadas para cada orientação, levando em consideração o potencial de obstrução da radiação solar direta, vistas externas e iluminação natural. Esses estudos serviram de base para o sistema de sombreamento adotado nas simulações de termodinâmica realizadas no software EDSL TAS (EDSL, 2019).

O capítulo 5 abordou os procedimentos metodológicos dos estudos analíticos incluindo: a construção do caso-base de simulação e seu detalhamento no que tange às características construtivas, ao padrão de ocupação, assim como aos cenários

alternativos de teste, seguidos pelas etapas das simulações computacionais e dos critérios para a análise dos resultados.

Os estudos partiram de duas formas de planta (quadrada e retangular) que, de acordo com Pereira (2017), são encontradas com maior frequência nos edifícios de escritório em São Paulo projetados desde o ano 2000. Essas formas de planta configuraram os casos-base utilizados para as simulações computacionais. Além disso, foram definidos parâmetros como o WWR das fachadas, quantidade de pavimentos, profundidade de planta, metragem quadrada de cada pavimento e pé-direito.

Adicionalmente, foram estabelecidos os parâmetros de ocupação a serem utilizados nas simulações computacionais, tomando como base a densidade de ocupação de 10 m² por pessoa. Nessa seção foram definidos também os valores de calor sensível e latente provenientes de equipamentos, iluminação artificial e pessoas.

Subsequentemente, um conjunto de cenários alternativos de modelos do caso-base (de planta quadrada e planta retangular) foi elaborado a partir de variações de características arquitetônicas do projeto, visando ao incremento do movimento de ar nos ambientes de trabalho e, conseqüentemente, a melhorias no desempenho térmico do modelo, ao longo de um ano típico. Tais variações arquitetônicas foram, por sua vez, baseadas em princípios da física aplicada, vistas nas lições aprendidas com o estudo de precedentes e a pesquisa de campo, e incluíram a inserção de elementos de sombreamento externo e vazios do tipo átrio de diferentes tamanhos e em diferentes localizações na planta.

Em relação à posição dos átrios na planta, é possível dividir os cenários em três grupos: átrios periféricos, átrios adjacentes ao núcleo e átrios centrais. Além da variação da posição dos átrios na planta, foram criados cenários variando a altura dos átrios (com 6 e 12 pavimentos), perfazendo um total de 36 cenários simulados.

Outrossim, foram abordados, de forma metodológica, todos os passos para configuração das simulações no software EDSL TAS (EDSL, 2019), incluindo: construção dos modelos 3D, seleção de arquivo com dados climáticos, inserção dos parâmetros de ocupação, operação e materiais de construção, inserção dos elementos de sombreamento e configuração da operação e aberturas de janelas.

Na conclusão do capítulo foram apresentados os critérios de análise dos resultados que focaram em três principais aspectos, sendo eles: desempenho térmico dos ambientes de trabalho com ênfase no conforto dos usuários, potencial de ventilação natural em cada um dos cenários e consumo energético (cargas de resfriamento).

O capítulo 6 discutiu o resultado das simulações computacionais realizadas para os diversos cenários de átrios e vazios abordados nesta pesquisa e, com base nesses resultados, foram elaboradas recomendações de projeto. Entre os principais resultados das simulações, podemos extrair as seguintes conclusões:

- A tipologia de átrios adjacentes apresentou os melhores resultados tanto para os cenários com 12 pavimentos como para os cenários com 6 pavimentos. Isso ocorreu porque a posição do átrio de forma adjacente ao núcleo contribui para reduzir a profundidade da planta, facilitando com que os ganhos de calor interno sejam removidos com mais facilidade. Ademais, a posição dos vazios permite que a ventilação cruzada ocorra sem obstruções, entre o átrio e a fachada externa. Vale notar que, nessa tipologia de átrios, foram alcançadas as maiores taxas de ventilação entre todos os cenários. Nota-se também que tal ventilação é mais potencializada na planta quadrada. A maior taxa de ventilação alcançada para todos os cenários foi de 27,68 TAH.
- Os átrios periféricos tiveram o pior desempenho entre as três tipologias analisadas. Uma das possíveis explicações para este fenômeno diz respeito à posição do átrio em relação à planta. Conforme explicado anteriormente, as simulações foram desenvolvidas com base nos modelos de referência, criados a partir das características de projeto de maior ocorrência no segmento de prédios corporativos da cidade de São Paulo. Nesses projetos, normalmente a planta não cumpre com os requisitos mínimos de profundidade para ventilação e iluminação naturais (CIBSE, 2005), configurando assim uma planta profunda. Desse modo, ao localizar os átrios (que impulsionam a ventilação) na área periférica da planta, a região que está mais próxima do núcleo não recebe ventilação adequada para remover os ganhos de calor provenientes de ocupação. Esta condição é ainda mais agravada no cenário com planta

retangular, no qual o núcleo conta com formato alongado, criando uma barreira ainda maior para que o ar flua e exerça ventilação cruzada com as fachadas opostas e adjacentes.

- Comparando as taxas de ventilação entre os cenários de mesma tipologia de átrio, nota-se que existe uma relação de proporcionalidade, pela qual os cenários com maiores taxas de ventilação oferecem melhor desempenho térmico. No entanto, ao comparar cenários com tipologias distintas de átrios, verifica-se que existem casos em que são alcançados melhores desempenhos térmicos, com taxas menores de ventilação. Isso ocorre porque a taxa de ventilação não é o único fator que influencia o desempenho térmico dos pavimentos. Cada cenário, de acordo com a forma do prédio e com a tipologia de átrio nele contida, está submetido a uma gama de fatores que podem influenciar na térmica, e entre eles estão os: ganhos de calor provenientes de radiação solar (mesmo com sombreamento, cada forma de prédio tem um comportamento) e as perdas de calor na envoltória por condução e convecção.
- Em relação à ventilação, nota-se que, de forma geral, quanto maior a altura do átrio, maiores são as taxas de ventilação e proporcionalmente melhor o desempenho térmico. Na maior parte dos casos, os átrios de 12 pavimentos desempenharam melhor que os átrios de 6 pavimentos, quando comparados átrios de mesma tipologia. Outro aspecto que também influencia na taxa de ventilação é a dimensão do átrio. Foi verificado que os átrios de maiores dimensões, de maneira geral, têm condição de ofertar maior potencial de ventilação natural por efeito chaminé.
- Outro aspecto interessante a ser ressaltado é que, ao comparar as variações térmicas entre átrios de mesma dimensão, mas com tipologias distintas, verifica-se que a diferença entre eles não é tão significativa. Por exemplo, o cenário de melhor desempenho da tipologia de átrios adjacentes teve 88 horas de superaquecimento (acima de 28°C), em contraste com as 111 horas obtidas na tipologia de átrios periféricos. Existe uma diferença entre os dois cenários de 23 horas/ano. Após as análises realizadas ao longo do capítulo 6, sabe-se que, em uma semana típica de verão, essas horas de superaquecimento

podem ocorrer em um período médio de seis horas por dia. Desse modo, é possível fazer uma comparação de que essas 23 horas a mais de superaquecimento no cenário de átrios periféricos poderiam resultar em quatro dias a mais com temperaturas acima de 28°C, em todo o ano. Estes valores não são expressivos para operação, considerando ainda que o edifício que está sendo proposto deve operar em modo misto.

Assim sendo, conclui-se que, entre os cenários simulados, o desempenho térmico não deve ser o único parâmetro de escolha para a melhor tipologia de átrio a ser inserida no projeto de um edifício de escritórios em São Paulo. Deve-se verificar, também, qual dos cenários tem melhores condições de ofertar níveis mais satisfatórios de luz natural e qual tipologia de átrio permite maior flexibilidade e adaptabilidade com relação a layout e ocupação espacial.

COMPROVAÇÃO DA TESE

A tese partiu da hipótese de que a inserção de átrios e vazios, como proposta de requalificação para os edifícios de escritório construídos em São Paulo desde o ano 2000, pode contribuir significativamente para ampliação do potencial de ventilação natural e, conseqüentemente, para a redução da demanda energética dessas edificações.

A hipótese foi comprovada, pois nos 36 cenários propostos, nos quais foram aplicadas diferentes dimensões e alturas de átrios, houve uma redução significativa no consumo energético quando comparados aos edifícios que operam durante todo o ano com climatização artificial (casos-base). Nesses cenários, foi considerado o modo misto de operação, que considera a climatização artificial operando somente nos períodos em que as temperaturas excedem os limites de aceitação térmica de 26°C. A redução no consumo energético anual alcançada no cenário de pior desempenho foi de 79,76% em relação ao caso-base. Já no cenário de melhor desempenho essa redução foi de 90,27%.

Adicionalmente, a pesquisa partiu também da premissa de que é possível alcançar um desempenho térmico e energético semelhante nos edifícios requalificados e em edifícios novos, com o benefício de que, nos edifícios requalificados, há uma redução significativa de energia incorporada na construção.

Na pesquisa, os cenários com átrios periféricos e adjacentes ao núcleo são possíveis de serem aplicados em casos de requalificação arquitetônica. Já os cenários com átrios centrais são viáveis somente em projetos novos, pois incorrem no deslocamento do núcleo central. Após realizar uma comparação das variações térmicas entre átrios de mesma dimensão, mas com tipologias distintas, verifica-se que a diferença entre eles não é tão significativa e pode-se dizer que apresentam um elevado grau de semelhança, demonstrando que a hipótese é válida. Adicionalmente, vale ressaltar também que os resultados das simulações revelaram que, em alguns casos, os cenários com átrios adjacentes ao núcleo desempenharam até melhor que nos cenários com átrios centrais, demonstrando que é possível se obter uma performance superior na requalificação em contraste com os edifícios novos.

APLICAÇÃO ARQUITETÔNICA DA PESQUISA

Nesta seção foram desenvolvidas imagens das fachadas para os cenários simulados do edifício de planta quadrada, de modo a ilustrar as estratégias de sombreamento utilizadas no projeto (dos cenários alternativos), assim como as aberturas de ventilação dos átrios. Foi gerado um total de seis perspectivas, para as três tipologias de átrios (adjacentes, centrais e periféricos). E cada perspectiva demonstrou duas fachadas (voltadas para orientações distintas) de cada cenário de átrio.

Em todas as fachadas, foi proposta a inserção de beirais de 1,5 m de comprimento, os quais, além de contribuir para as estratégias de sombreamento, oferecem uma facilidade para instalação dos brises, assim como para manutenção e limpeza dos elementos envidraçados. Adicionalmente, nos pavimentos de entrada e saída de ar dos átrios, foi proposto recuar um pouco a fachada dos escritórios, aumentando os beirais e permitindo a inserção de jardins, que proporcionam um

ambiente mais diversificado e biofílico, o qual, de acordo com Caputo (2019), pode melhorar a saúde psicológica dos usuários, além do potencial de oferecer resfriamento adicional decorrente da evapotranspiração das plantas. Vale ressaltar que, além dos beirais prolongados com jardins, em razão da necessidade de abertura para entrada e saída de ar dos átrios, esses pavimentos já contam com varandas generosas, proporcionando aos usuários um espaço descontraído para trabalho, descompressão e reuniões.

Nestas imagens, todos os átrios foram considerados com 12 pavimentos e, no cenário de átrios adjacentes, foram propostos elementos em forma de caixa, que marcam a entrada e saída de ar na fachada (figuras 112 e 113).



Figura 112. Perspectiva do edifício de planta quadrada com átrios adjacentes ao núcleo. A imagem apresenta as fachadas sul (à esquerda) e leste (à direita).

Fonte: Autor da tese.



Figura 113. Perspectiva do edifício de planta quadrada com átrios adjacentes ao núcleo. A imagem apresenta as fachadas norte (à esquerda) e oeste (à direita).

Fonte: Autor da tese.



Figura 114. Perspectiva do edifício de planta quadrada com átrio central e núcleos nas laterais. A imagem apresenta as fachadas sul (à esquerda) e leste (à direita).
Fonte: Autor da tese.

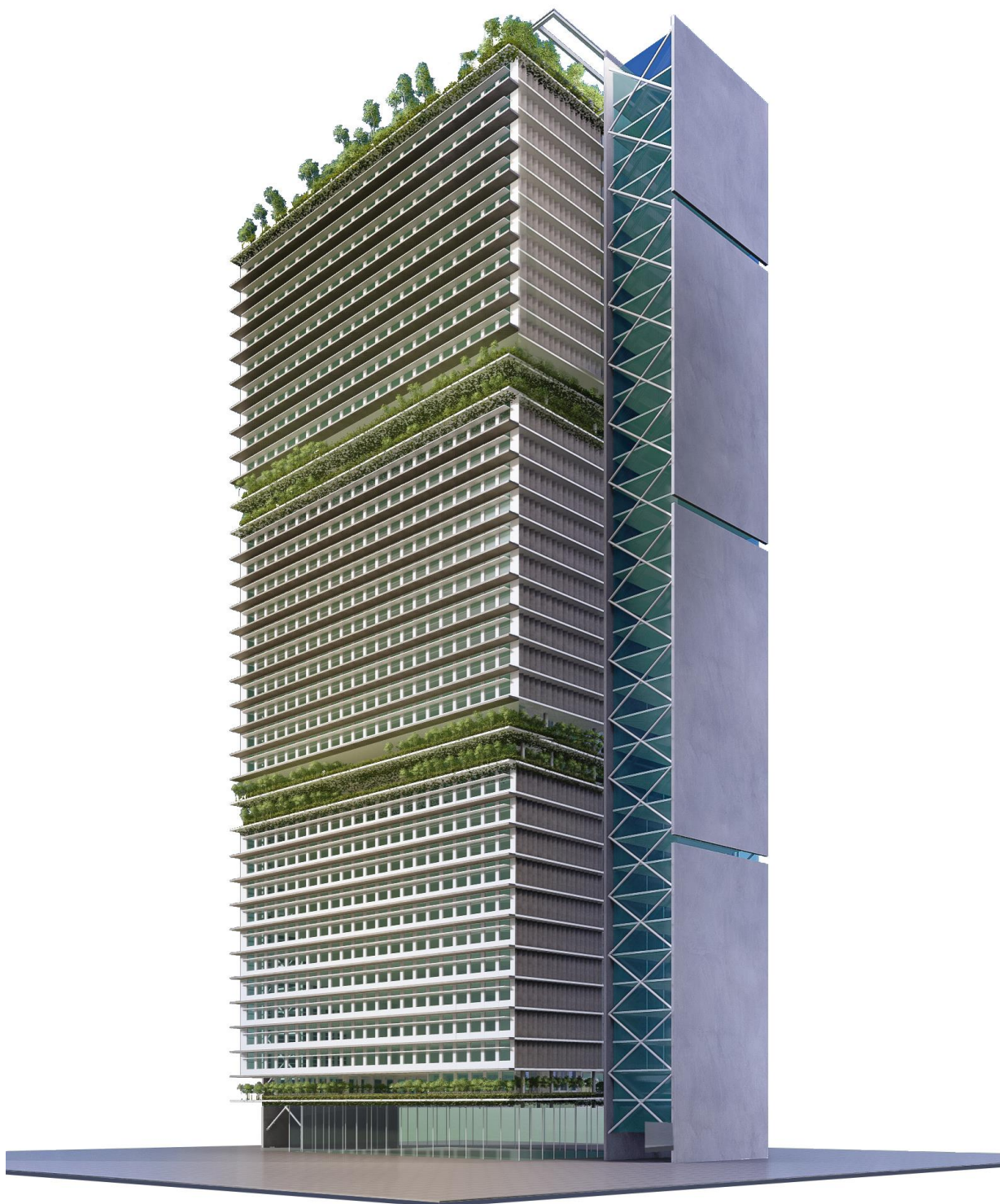


Figura 115. Perspectiva do edifício de planta quadrada com átrio central e núcleos nas laterais. A imagem apresenta as fachadas norte (à esquerda) e oeste (à direita).

Fonte: Autor da tese.



Figura 116. Perspectiva do edifício de planta quadrada com átrios periféricos. A imagem apresenta as fachadas sul (à esquerda) e leste (à direita).

Fonte: Autor da tese.



Figura 117. Perspectiva do edifício de planta quadrada com átrios periféricos. A imagem apresenta as fachadas norte (à esquerda) e oeste (à direita).

Fonte: Autor da tese.

LIMITAÇÕES DO TRABALHO E DESDOBRAMENTOS FUTUROS

Podemos apontar os seguintes pontos como limitações da pesquisa:

- Nas simulações de planta retangular, não foram avaliadas as simulações de todos os cenários nas orientações leste e oeste.
- Não foi realizada uma análise de iluminação natural para os formatos de planta propostos, a fim de se obter uma indicação mais precisa a respeito de qual percentual da planta poderia operar sem utilizar iluminação artificial, o que impactaria nos ganhos de calor internos utilizados nas simulações.
- Não foram testados os desempenhos térmicos de átrios com 18 ou 36 pavimentos.
- Não foi realizada uma análise financeira demonstrando, em caso de *retrofit*, a perda de área locável para criação dos átrios (em adição ao custo das melhorias na envoltória), em comparação com o ganho qualitativo e no valor do aluguel/m² do edifício.

Com base na pesquisa realizada, considerando as oportunidades e lacunas para o aprimoramento do tema, sugerem-se como trabalhos futuros os seguintes tópicos:

- Realizar simulações de CFD para confirmar as hipóteses da tese referentes a variações de temperatura entre pavimentos. Nesse caso seria possível ver, em corte, a diferença de temperatura ocasionada pela estratificação térmica do(s) átrio(s).
- Realizar simulações de CFD em todas as plantas para verificar a distribuição de temperatura e o fluxo de ar, possibilitando uma compreensão a respeito de quais áreas na planta recebem menos ventilação e qual o impacto disso na temperatura dos espaços de trabalho.
- Realizar simulações de CFD para cálculo de coeficiente de pressão, com o objetivo de avaliar, com maior acuracidade, como os modelos desempenham termicamente em um cenário com vento. E podendo gerar assim uma comparação mais precisa com os cenários sem vento externo, que foram simulados nesta pesquisa.

- Realizar um estudo aprofundado de iluminação natural entre os diversos cenários simulados, para obter melhor entendimento a respeito de qual cenário proporciona os melhores níveis de iluminação natural, dando maior embasamento às decisões de projeto.

Referências Bibliográficas

ABNT. ABNT NBR 6120: Cargas para o cálculo de estruturas de edificações. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

ABNT. ABNT NBR 16401: Instalações de ar-condicionado – Sistemas centrais e unitários. Parte 1: Projetos de instalações. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, 2013.

ANDRADE, C.M. Avaliação de desempenho em edifícios de escritório: o ambiente de trabalho como meio para o bem-estar produtivo. 2005. Tese de Doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

ANEL. Ranking das tarifas por região. 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/ranking-das-tarifas>

ARENS, E. et al. Partial- and whole-body thermal sensation and comfort - Part I: Uniform environmental conditions. Journal of Thermal Biology 31: 53-59. 2006

ASHRAE Standard 55R – Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy, Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc. 2010

ASHRAE. Standard 55-2004: Thermal Environment Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers (ASHRAE), 2004

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 9077: Saídas de emergência em edifícios. Rio de Janeiro: ABNT, 2001.

AUTODESK. CFD Simulation Software. 2013

AYNSLEY, R. M.; MELBOURNE, W.; VICKERY, B. J. Architectural Aerodynamics. Londres: Applied Science Publishers Ltd., 1977.

BAKER, N. Passive and Low Energy Building Design for Tropical Island Climates. Londres: Commonwealth Science Council, 1987.

BAKER, N; STEEMERS, K. Daylight Design of Buildings. James & James Science Publisher, 2002.

BAKER N.V. Adaptive thermal comfort standards for building refurbishment. Revival Technical Monograph 2. 2009

BAKER, N.V. A Handbook of Sustainable Refurbishment: Non-Domestic Buildings. Earthscan, 2009

BAKER, N.V. Principles of natural ventilation. Environmental and Energy Programme, AA School, London, 2012.

BARKER T.; BOGNER, J.E.; BOSCH, P.R.; FISHER,B.S. 'Technical Summary'. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, 2007.

BITTENCOURT, L. et al. Ventilação Natural em Edificações. Procel Edifica – Eletrobras, 2010.

CAPUTO, J.V. The role of voids in the overall performance of tall buildings. Dissertation (M.S.c) – Architecture and Environmental Design, AA School, London, 2012. University of Westminster, 2019.

CHOI, J et al. Post-occupancy Evaluation in 20 Office Buildings towards Future IEQ Standards and Guidelines, 2010.

CIBSE. Daylighting and Window Design. Lighting Guide LG10. Chartered Institution of Building Services Engineers, London. 1999

CIBSE. Environmental design. Guide A, 8th Edition. Chartered Institution of Building Services Engineers, London, 2019.

CIBSE. Natural ventilation in Non-Domestic Buildings. Application Manual AM10. Chartered Institution of Building Services Engineers, London, 2005.

CLEMENTS-CROOME, D. J. Creating the Productive Workplace. Spon-Routledge. London, 2006

COTTA, J.P.O. The impact of window design in the environmental performance of work environments in São Paulo. Dissertation (M.S.c) – SED, Environmental and Energy Programme, AA School, London, 2012.

EDSL – Environmental Design Solutions Limited. Tas Version 9.4.4. United Kingdom. Milton Keynes.2019

EN 15251. Indoor Environmental Input Parameters for Design and Assessment of Energy Performance of Buildings – Addressing Indoor air Quality, Thermal Environment, Lighting and Acoustics, English version, 2007

ENEL. Impostos e outros encargos 2020. Disponível em: https://www.enel.com.br/pt-saopaulo/Corporativo_e_Governo/impostos-e-outros-encargos.html

EPE. Estudos de Demanda de Energia, Nota técnica DEA 13/14: Demanda de Energia 2050. Plano Nacional de Energia 2050, Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2014-1

EPE. Balanço Energético Nacional 2015: Ano base 2014. Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro, 2015.

EPE - Plano Nacional de Energia 2050. Empresa de Pesquisa Energética, Rio de Janeiro, 2020

FANGER, P. O. Thermal comfort: analysis and applications in environmental engineering: Mc Graw-Hill, 1970

GHIAUS, C; ALLARD, F. Natural Ventilation in Urban Environment: Assessment and Design. Earthscan, 2005.

GIVONE, B. Man, climate and architecture. London: Applied Science Publishers, 1976.

GIVONE, B. Passive and Low Energy Cooling of Buildings. Van Nostrand Reinhold, 1994

GONÇALVES, J.C; UMAKOSHI, E. The environmental performance of tall buildings. Earthscan, 2010.

GONÇALVES, J., BODE, K. (org.) Edifício Ambiental. São Paulo: Oficina de textos, 2015.

HAMMOND, G; JONES, C; Embodied carbon, the inventory of carbon and energy. BSRIA Guide. University of Bath. United Kingdom.2011

HOLFORD, JM; HUNT, G. Fundamental atrium design for natural ventilation. Building and Environment, 2003.

HUMPHREYS, M.A; NICOL, J.F. Outdoor temperature and indoor thermal comfort: raising the precision of the relationship for the 1998 ASHRAE database of field studies ASHRAE Transactions 206(2) pp 485-492. 1998

INMET – Instituto Nacional de Meteorologia. Arquivos climáticos. 2018. Disponível em: <https://labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet>. 2018

JLL. On Point. Publicação trimestral do departamento de Pesquisa e Inteligência de Mercado da JLL | 4º trimestre de 2015. São Paulo, 2016.

KEIGHLEY, E.C. Visual requirements and reduced fenestration in offices: a study of window shape, Building Science 8 311–320, 1973.

KHALIL, N et al. Post Occupancy Evaluation towards Indoor Environment Improvement in Malaysia's Office Buildings. University Technology of MARA Perak. Malaysia, 2009

KOENIGSBERGER, O.; INGERSOL, T.G.; MAYTHEW, A.; SZOKOLAY, S. V. Manual of tropical housing and building. Part I: Climatic Design. London: Longman, 1974.

LAMBERTS et. al. Towards a Brazilian standard for naturally ventilated buildings: guidelines for thermal and air movement acceptability. In Adaptive comfort. Routledge, 2011.

LEE, K. The environmental role of transitional spaces in residential tall buildings in Seoul, Korea: with reference to natural ventilation strategies. Dissertation (M.S.c) – Environmental and Energy program, Architectural Association School of Architecture. Londres, 2011.

MAK, N. Thermal stratification in atria. Bachelor of engineer thesis. The university of Wollongong. Australia. 1991.

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

MARCONDES, M. Soluções Projetuais de Fachadas para Edifícios de Escritórios com Ventilação Natural em São Paulo. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura, FAU USP, São Paulo, 2010.

MARCONDES, M; GONÇALVES, J; CUNHA, G. Iluminação natural em edifícios de escritório: avaliação dinâmica de desempenho para São Paulo. PARC Pesq. em Arquit. e Constr., Campinas, SP, v. 9, n. 1, p. 19-34, mar. 2018. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20396/parc.v9i1.8650725>

METEOTEST. Meteonorm 6.1. Bern, Switzerland. 2009.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, BRASIL. Ar condicionado: manual sobre sistemas de água gelada: conceitos sobre chillers e sistemas de água gelada / Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Mudança do Clima e Florestas, Departamento de Monitoramento, Apoio e Fomento de Ações em Mudança do Clima. Brasília, DF: MMA, 2017. 3 v.

MOOSAVI, L; MAHYUDDIN,N; GHAFAR,N; ISMAIL,M. Thermal performance of atria: An overview of natural ventilation effective designs. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014.

NE'EMAN, E.; HOPKINSON, R.G. Critical minimum acceptable window size: a study of window design and provision of view, pp17–27. Lighting Research and Technology, 1970.

NEOENERGIA. Projeto para novo escritório sede da empresa Neoenergia em Campinas. Oliveira Cotta Arquitetura. Campinas, 2018. Disponível em: <http://www.oliveiracotta.com.br/pt/projetos/view.php?c=757>

NICOL, F. AND HUMPHREYS, M.A. Adaptive Thermal Comfort and Sustainable Thermal Standards for Buildings. Oxford Centre for Sustainable Development, 2002.

NICOL, F.; HUMPHREYS, M; ROAF, S. Adaptive Thermal Comfort: Principles and Practice. London, 2012.

NICOL, F; S. ROAF. Adaptive Thermal Comfort and Passive Architecture. In Advances in Passive cooling. Earthscan,2007.

OKE, T.R. Boundary Layer Climates. 2nd Edition, Methuen Co., London, New York, 1987.

OSTERHAUS, W.K. Discomfort glare from daylight in computer offices: What do we really know? in: Proceedings of the 9th European Lighting Conference (Lux Europa), Reykjavik, Iceland, 2001.

PEREIRA, D. C. L. Iluminação natural em edifícios de escritório: metodologia para a avaliação do desempenho luminoso. Tese (Doutorado) - Curso de Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura, FAU USP, São Paulo, 2017.

PROCEL – PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Pesquisa de mercado 2007. Ministério de Minas e Energia; Eletrobras, 2007.

PURATOS. Projeto para novo escritório sede da empresa Puratos em São Paulo. Oliveira Cotta Arquitetura. Campinas, 2018. Disponível em:

<http://www.oliveiracotta.com.br/pt/projetos/view.php?c=752>

SANTAMOURIS, M; WOUTERS, P. Building Ventilation: The State of Art. Earthscan, 2006.

THE ECONOMIST. Data is giving rise to a new economy. Abr/mai. 2017. The Economist, Londres, 2017. Disponível em:

<https://www.economist.com/briefing/2017/05/06/data-is-giving-rise-to-a-new-economy>.

WANG, F; ABDULLAH, A.H. Modelling thermal stratification in atrium using TAS program and verification of prediction results. International Journal of Integrated Engineering. Scotland, United Kingdom, 2016.

WELLS, B.W.P. Subjective responses to the lighting installations in a modern office building and their design implications, pp 57–68. Building and Environment, 1996.

WOOD, A; SALIB, R. Natural Ventilation in High-Rise Office Building. Routledge, 2013.

YANNAS, S. Designing for Summer Comfort. Environmental & Energy Studies Programme, AA Graduate School. London, 2000.

ZHANG et al. Air movement preferences observed in office buildings. Windsor: workings of the CBE Thermal Comfort Workshop, 2011.

ZHANG et al. Air temperature thresholds for indoor comfort and perceived air quality. In Adaptive comfort. Routledge, 2011.

