

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ARQUITETURA E URBANISMO DE SÃO CARLOS

HÉCTOR FABIÁN MARÍN CASTAÑO

Impacto de dispositivos de sombreamento externos e muro na
ventilação natural e no desempenho térmico de uma habitação de
interesse social térrea

São Carlos
2017

HÉCTOR FABIÁN MARÍN CASTAÑO

Impacto de dispositivos de sombreamento externos e muro na
ventilação natural e no desempenho térmico de uma habitação de
interesse social térrea

Dissertação apresentada ao Instituto de Arquitetura
e Urbanismo de São Carlos da Universidade de São
Paulo, como parte dos requisitos para a obtenção
do título de Mestre em Arquitetura e Urbanismo.

Área de concentração:
Arquitetura, Urbanismo e Tecnologia

Orientadora:
Prof^a. Dr^a. Karin Maria Soares Chvatal

Apoio:
Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de
Nível Superior – CAPES

(versão corrigida)

São Carlos
2017

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

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do Instituto de Arquitetura e Urbanismo
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M337i Marín Castaño, Héctor Fabián
Impacto de dispositivos de sombreamento externos
e muro na ventilação natural e no desempenho térmico
de uma habitação de interesse social térrea / Héctor
Fabián Marín Castaño; orientadora Karin Maria Soares
Chvatal . -- São Carlos, 2017.
178 p.

Dissertação (Mestrado - Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo, Arquitetura, Urbanismo e
Tecnologia) -- Instituto de Arquitetura e Urbanismo,
Universidade de São Paulo, 2017.

1. Ventilação natural. 2. Dispositivos de
sombreamento. 3. Muro. 4. Túnel de vento. 5.
Coeficientes de pressão. I. Chvatal , Karin Maria
Soares, orient. II. Título.

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato(a): **Héctor Fabián Marín Castaño**

Título da dissertação: "Impacto dos dispositivos de sombreamento externos e muros na ventilação natural e no desempenho térmico de uma habitação de interesse social térrea"

Data da defesa: 09/05/2017

Orientador: Profa. Dra. Karin Maria Soares Chvatal

Comissão Julgadora:

Resultado:

Profa. Dra. Karin Maria Soares Chvatal



(IAU/USP)

Profa. Dra. Rosana Maria Caram

(IAU/USP)



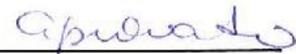
Prof. Dr. Daniel Cóstola

(University of Strathclyde(Escócia))



Prof. Dr. Gilder Nader

(IPT)



APROVADO

APROVADO

Coordenadora e Presidente da Comissão de Pós-Graduação do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo: Profa. Dra. Cibele Saliba Rizek.

Este trabajo está dedicado a mis padres, Fabián y Nelcy.

AGRADECIMENTOS

Agradezco a mis padres Fabián y Nelcy por su apoyo incondicional, a mis hermanas Deissy y Eliana por estar ahí firmes y siempre presentes, son mi fuerza y mi motivación. Gracias por creer en mi y alentar mis objetivos. El camino siempre será más liviano con ustedes de mi lado.

À professora Karin Chvatal, por sua valiosa orientação e dedicação nesta pesquisa, por acreditar em mim e alentar meu caminho como pesquisador. Mi admiração por seu trabalho e conhecimento.

Aos meus amigos do grupo ArqTema em especial a Michele, Rosilene, Caroline, Ana, Pilar, Andrey, Pedro, Vanessa, Marieli e Camila, que além das contribuições acadêmicas, ensino e ajuda incondicional em todo o processo desta pesquisa, pelo qual me sinto em grande dívida, agradeço pela sua amizade, com certeza fizeram de mim uma melhor pessoa e profissional.

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo (IPT), por sua enorme contribuição, de forma especial ao professor Gilder Nader, por acreditar nesta pesquisa e disponibilizar o seu tempo, pessoal e instalações para a realização dos ensaios no túnel do vento.

Aos professores, técnicos, colegas do IAU/USP e colaboradores externos, que de forma direta ou indireta aportaram com seu conhecimento ou labor ao termino deste trabalho.

Agradeço a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo apoio e fomento a este trabalho de pesquisa.

“O primeiro pecado da humanidade foi a fé; a primeira virtude foi a dúvida.”

— Carl Sagan

RESUMO

MARIN, H. F. C. **Impacto de dispositivos de sombreamento externos e muro na ventilação natural e no desempenho térmico de uma habitação de interesse social térrea.** 2017. 89 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2017.

Uma importante estratégia de projeto para melhorar o desempenho térmico das edificações em climas quentes e úmidos é a adoção conjunta da ventilação natural e de dispositivos de sombreamento. Contudo, quando a ventilação natural é ocasionada pela ação dos ventos nas edificações, as pressões do vento nas envoltórias da edificação são alteradas com a presença de elementos externos próximos que mudam as características do fluxo incidente. Deste modo, o presente trabalho tem como objetivo avaliar os impactos na ventilação natural, e nas temperaturas internas do ar e/ou no conforto térmico de uma habitação térrea em um clima quente e úmido, a partir do uso de diferentes dispositivos de sombreamento externos e muro. Para isso, foram realizadas simulações computacionais no programa *EnergyPlus* através do módulo *AirflowNetwork*. Foram realizados ensaios em túnel de vento de Camada Limite Atmosférica (CLA) para a obtenção dos coeficientes de pressão (Cps). Os resultados apontaram impactos específicos a cada elemento estudado, no entanto o fenômeno mais frequente nos casos com dispositivos de sombreamento foi a redução dos efeitos de sobrepressão e sucção. Quanto aos seus impactos nas renovações de ar, estes provocaram uma diminuição do fluxo de ar e, conseqüentemente, o aumento da temperatura no período predominantemente noturno. Entretanto, foi observado um maior impacto na atenuação das temperaturas internas nos períodos diurnos, que prevaleceu sobre o aumento nos períodos de ventilação. Destacou-se, dentre os dispositivos de sombreamento estudados, as proteções tipo veneziana por proporcionarem um melhor desempenho térmico. Já os muros, dentre todos os elementos estudados, foram os que tiveram maior impacto nos Cps. Tal fenômeno significou a diminuição da taxa de renovação de ar dentre 50 e 75%. O impacto mais sobressalente nas temperaturas internas nestes casos foi o aumento destas no período noturno, limitando o potencial da ventilação natural para a remoção de calor da edificação.

Palavras-chave: Ventilação natural. Dispositivos de sombreamento. Muro. Túnel de vento. Coeficientes de pressão. Simulação computacional.

ABSTRACT

MARIN, H. F. C. **Impact of external shading devices and wall on natural ventilation and thermal performance of a ground floor low-cost house**. 2017. 89 s. Thesis (Master) – Institute of Architecture and Urbanism f São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2017.

An important design strategy for improving the thermal performance of buildings in hot and humid climates is the adoption of natural ventilation strategies and shading devices combined. However, when natural ventilation is wind-driven, the wind pressures on the building envelope are altered by the presence of nearby external elements that change the incident flow's characteristics. Thus, the present work aims to evaluate the impacts on natural ventilation, and the internal air temperatures and/or the thermal comfort of a single ground floor low-cost house in a hot and humid climate, considering the use of different external shading devices and walls. For such, computational simulations were performed in the EnergyPlus program using the AirflowNetwork module. Atmospheric Limit Wind (CLA) wind tunnel tests were performed to obtain pressure coefficients (Cps). The results indicated specific impacts to each element studied, however the most frequent phenomenon in cases with shading devices was the reduction of the effects of overpressure and suction. As for their impacts on air changes rate, they caused a decrease in airflow and, consequently, an increase in temperature predominantly in the nocturnal period. However, a greater impact was observed in the attenuation of internal temperatures in the daytime periods, which prevailed over the increase in ventilation periods. Among the shading devices studied, venetian type protections for providing better thermal performance were highlighted. Among all the elements studied, the walls had the greatest impact on the Cps. This phenomenon meant the reduction of the air changes rate between 50 and 75%. The most significant impact on internal temperatures in these cases was the their increase at night, limiting the potential of natural ventilation to the removal of heat from the building.

Keywords: Natural ventilation. Shading devices. Wall. Wind tunnel. Wind Pressure coefficients. Computational Simulation

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfis de velocidade média do vento de acordo com a rugosidade do terreno (Km/h)	37
Figura 2 - Distribuição das pressões ocasionadas pela força dos ventos.	39
Figura 3 - Esquema em planta das três zonas formadas no escoamento do vento em torno de um corpo.	39
Figura 4 - Ventilação por ação dos ventos (pressões positivas e negativas).....	40
Figura 5 - Gráfico do aumento da temperatura de conforto em relação à velocidade do ar.....	42
Figura 6 - Regulagem do fluxo do ar através de venezianas móveis.....	44
Figura 7 - Desempenho das janelas basculantes com venezianas.....	44
Figura 8 - Velocidade interna média em função da relação do tamanho das aberturas e direção dos ventos para 45° e 90°.....	44
Figura 9 - Influência da forma da abertura na velocidade do ar em diferentes ângulos do vento.....	45
Figura 10 - Projeções verticais podem interferir no fluxo do ar.	46
Figura 11 - Elementos horizontais e as alterações no fluxo do ar.	47
Figura 12 - Efeito combinado de elementos verticais e horizontais na velocidade do vento.....	48
Figura 13 - Exemplo da distribuição do Cp no edifício.	50
Figura 14 - Representação do modelo de rede em um edifício multi-zona.	54
Figura 15 - Modelo de rede e possível percurso do fluxo do ar entre zonas no EP.	54
Figura 16 - Túnel de retorno fechado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.	56
Figura 17 - Túnel de retorno aberto da Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Argentina.....	56
Figura 18 - Ensaio qualitativo por meio de fumaça.....	58
Figura 19 - Ensaio qualitativo por meio de erosão com areia.	58
Figura 20 - Dispositivo emissor de jatos do túnel de vento pelo método ativo.	59
Figura 21 - Arranjo típico dos dispositivos de simulação em túnel de vento.	60
Figura 22 - Crescimento natural da CLA em túnel de vento.	60
Figura 23 - Esquema da disposição dos elementos de rugosidade para simulação da CLA.....	60
Figura 24 - Dispositivos de simulação tipo Counihan modificado.....	61

Figura 25 - Dispositivos de simulação tipo Standen modificado.....	61
Figura 26 - Ilustração do funcionamento do tubo de <i>Pitot</i> Prandtl	63
Figura 27 - Anemômetro de fio quente CTA.	63
Figura 28 - Linhas do fluxo por meio de fumaça	63
Figura 29 - Sensor de anemômetro de fio quente	63
Figura 30 - Pressure scanner.....	64
Figura 31 - Troca de calor através de superfícies translúcidas ou transparentes.	67
Figura 32 - Fluxo de calor através de diferentes elementos da envoltória.	68
Figura 33 - Carta solar para a latitude 24° sul.	70
Figura 34 - Modelo de transferidor auxiliar.....	70
Figura 35 - Exemplos de ângulos de sombra gerados por dispositivos de proteção solar horizontais e verticais.	71
Figura 36 - Alternativa 1: placa horizontal sobre limite superior da abertura	71
Figura 37 - Alternativa 2: combinação de placa horizontal e vertical.	71
Figura 38 - Configurações de dispositivos de sombreamento estudados.....	74
Figura 39 - Configurações dos dispositivos de sombreamento estudados.	74
Figura 40 - Efeito do dispositivo de sombreamento (tipo L, caixa, múltiplo) na média de velocidade interna do vento.	75
Figura 41 - Efeito produzido por diferentes espaçamentos de dispositivos de proteção solar.....	76
Figura 42 - Influência de diferentes projeções de protetores horizontais.....	76
Figura 43 - Configurações de telhados.....	77
Figura 44 - Modelos 01-02 sem varanda; modelos 03-21 combinações de varandas e tipos de janelas; modelos 22-33 alternativas com diferentes configurações internas	78
Figura 45 - Esquema do modelo 3D.	80
Figura 46 - Efeito da disposição do muro de fechamento (distância e altura) nos fluxos do vento ao redor da edificação.....	80
Figura 47 - Efeito no fluxo do vento na ventilação natural de uma edificação para diferentes índices de porosidade do muro, (a) 0,5, (b) 0,3, (d) 0,1	80
Figura 48 - Esquema do modelo 3D.	81
Figura 49 - Comparação do fluxo médio da velocidade em corte para (a) índice de porosidade baixo e (b) alto.....	81
Figura 50 - Eixos de tomada de C_p no modelo objeto de estudo.....	82
Figura 51 -Variação dos C_p em diferentes alturas de sacadas nos eixos E_u e E_d	82

Figura 52 - Esquema geral do método.....	85
Figura 53 - Túnel de vento do IPT.....	97
Figura 54 - Corte e planta do túnel de vento de CLA do IPT.....	98
Figura 55 - Processo de corte das peças do modelo.	100
Figura 56 - Ilustração dos componentes móveis e fixos do modelo.	100
Figura 57 - Exemplificação: encaixes macho-fêmea para os dispositivos tipo veneziana para os três tamanhos de janela.....	100
Figura 58 - Distribuição dos pontos de tomada de pressão para os três tamanhos de janelas.....	101
Figura 59 - Denominação de janelas e enumeração para cada ponto de tomada de pressão e a altura concedida para cada ponto.....	101
Figura 60 - Fotos das combinações testadas no túnel de vento de CLA do IPT de São Paulo (representação para um tamanho de janela).....	104
Figura 61 - Faixa de conforto proposta pela norma ASHRAE Standard 55 (2013): Variação de temperatura operativa aceitável em ambientes naturalmente ventilados.....	112
Figura 62 - Coeficientes de pressão para todos os pontos medidos na janela intermediária (1x1,6m), para a sala-cozinha e os quartos 1 e 2, sem elementos externos à fachada.....	118
Figura 63 - Coeficientes de pressão para todos os pontos medidos na janela intermediária (1x1,6m), para todos os casos estudados.	120
Figura 64 - Diferença entre os Cps por ângulo de incidência do vento do quarto 1 para os casos (a) H1_1X1,6 - R_1X1,6; (b) H2_1X1,6 - R_1X1,6; (c) H3_1X1,6 - R_1X1,6.	121
Figura 65 - Diferença entre os Cps por ângulo de incidência do vento do quarto 1 para os casos E1_1X1,6 - R_1X1,6.....	122
Figura 66 - Diferença entre os Cps por ângulo de incidência do vento do quarto 1 para os casos E2_1X1,6 - R_1X1,6.....	123
Figura 67 - Diferença entre os Cps por ângulo de incidência do vento do quarto 1 para os casos (a) RM_1X1,6 - R_1X1,6; (b) E2_M_1X1,6 - E2_1X1,6.	124
Figura 68 - Diferença entre Cps de janelas opostas para todos os casos com janelas de tamanho intermediário (1x1,6m):(a) quarto 1 e sala-cozinha (Diferencial Q1),	126
Figura 69 - Diferença entre os Cps para o caso com (E2_1X1,6) e sem (R_1X1,6) varanda por ângulo de incidência do vento do quarto 1.	128

Figura 70 - Valores médios horários para as temperaturas do ar externa e interna, taxa de renovação de ar, e fator de abertura da janela do quarto 1 em novembro, do caso E2_1X1,6_N2.	129
Figura 71 - Faixas de diferença percentual das taxas de renovação de ar dos casos com (E2_1X1,6_N1) e sem (R_1X1,6_N1) varanda.	129
Figura 72 - Faixas de diferença percentual das taxas de renovação de ar dos casos com (E2_1X1,6_N2) e sem (R_1X1,6_N2) varanda.	130
Figura 73 - Taxa de renovação de ar para todos ambientes durante um ano para os casos (a) R_1X1,6_N1 e (b) R_1X1,6_N2.....	131
Figura 74 - Médias horarias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com (E2_1X1,6_N1) e sem (R_1X1,6_N1) varanda, do quarto 2.....	133
Figura 75 - Médias horarias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com (E2_1X1,6_N2) e sem (R_1X1,6_N2) varanda, do quarto 2.....	133
Figura 76 - Faixas de diferença entre as temperaturas internas do ar para os três ambientes dos casos com (E2_1X1,6_N1) e sem (R_1X1,6_N1) varanda.....	134
Figura 77 - Faixas de diferença entre as temperaturas internas do ar para os três ambientes dos casos com (E2_1X1,6_N2) e sem (R_1X1,6_N2) varanda.....	134
Figura 78 - Graus-hora de desconforto por calor (°Ch 90%) para todos os ambientes analisados considerando os casos dos casos com e sem varanda	135
Figura 79 - Graus-hora de desconforto por calor (°Ch 90%) para todos os ambientes analisados considerando os casos com e sem varanda.....	135
Figura 80 - Valores médios horários para as temperaturas do ar externa e interna, taxa de renovação de ar, e fator de abertura da janela do quarto 1 em novembro, do caso H1_1X1,6_N2.....	143
Figura 81 - Médias horarias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com (H1_1X1,6_N1) e sem (R_1X1,6_N1) dispositivo de sombreamento horizontal básico, do quarto 2.	147
Figura 82 - Médias horarias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com (H1_1X1,6_N2) e sem (R_1X1,6_N2) dispositivo de sombreamento horizontal básico, do quarto 2.	147

Figura 83 - Médias horarias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com (H2_1X1,6_N1) e sem (R_1X1,6_N1) dispositivo de sombreamento horizontal afastado, do quarto 2.	148
Figura 84 - Médias horarias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com (H2_1X1,6_N2) e sem (R_1X1,6_N2) dispositivo de sombreamento horizontal afastado, do quarto 2.	148
Figura 85 - Médias horarias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com (H3_1X1,6_N1) e sem (R_1X1,6_N1) dispositivo de sombreamento tipo veneziana, do quarto 1.	149
Figura 86 - Médias horarias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com (H3_1X1,6_N2) e sem (R_1X1,6_N2) dispositivo de sombreamento tipo veneziana, do quarto 1.	149
Figura 87 - Médias horarias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com (E1_1X1,6_N1) e sem (R_1X1,6_N1) dispositivo de sombreamento tipo "L", do quarto 2.	150
Figura 88 - Faixas das diferenças nas temperaturas internas para todos os ambientes nas orientações N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste) dos casos (a) H1_1X1,6_N1 - R_1X1,6_N1 e (b) H1_1X1,6_N2 - R_1X1,6_N2.	151
Figura 89 - Faixas das diferenças nas temperaturas internas para todos os ambientes nas orientações N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste) dos casos (a) H2_1X1,6_N1 - R_1X1,6_N1 e (b) H2_1X1,6_N2 - R_1X1,6_N2.	151
Figura 90 - Faixas das diferenças nas temperaturas internas para todos os ambientes nas orientações N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste) dos casos (a) H3_1X1,6_N1 - R_1X1,6_N1 e (b) H3_1X1,6_N2 - R_1X1,6_N2.	152
Figura 91 - Faixas das diferenças nas temperaturas internas para todos os ambientes na orientação N1 (Norte-Sul) dos casos E1_1X1,6_N1 - R_1X1,6_N1.	152
Figura 92 - Valores médios horários para as temperaturas do ar externa e interna, taxa de renovação de ar, e fator de abertura da janela do quarto 1 em novembro, do caso RM_1X1,6_N2.	154
Figura 93 - Efeito de sombreamento do muro na edificação em junho para as orientações N1 (a) 6:30h; (b) 17:30h, e N2 (c) 6:30h; (d) 17:30h.	159
Figura 94 - Médias horarias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com (RM_1X1,6_N1) e sem (R_1X1,6_N1) muro de fechamento, do quarto_2.	161

Figura 95 - Médias horarias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com (RM_1X1,6_N2) e sem (R_1X1,6_N2) muro de fechamento, do quarto_2.	161
Figura 96 - Médias horarias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com varanda mais muro (E2_M_1X1,6_N1) e varanda (E2_1X1,6_N1) do quarto_2.....	162
Figura 97 - Médias horarias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com varanda mais muro (E2_M_1X1,6_N2) e varanda (E2_1X1,6_N2) do quarto_2.....	162
Figura 98 - Faixas de diferença entre as temperaturas internas do ar para os três ambientes dos casos: (a) RM_1X1,6_N1 - R_1X1,6_N1; (b) RM_1X1,6_N2 - R_1X1,6_N2; (c) RM_M_1X1,6_N1 - RM_1X1,6_N1; (d) RM_M_1X1,6_N2 - R_1X1,6_N2.	163

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Panorama do clima de Natal –RN.....	87
Quadro 2 - Características arquitetônicas do edifício estudado	89
Quadro 3 - Máscaras de sombra e características geométricas e dimensionamento dos dispositivos de sombreamento horizontais	92
Quadro 4 - Máscara de sombra e características geométricas e dimensionamento dos dispositivos de sombreamento tipo “L”.....	93
Quadro 5 - Máscara de sombra e características geométricas e dimensionamento da varanda.....	94
Quadro 6 - Geometria e dimensões do muro de fechamento.....	95
Quadro 7 - Casos de estudo.	96
Quadro 8 - Descrição das características do modelo.....	99
Quadro 9 - Componentes construtivos e padrão de uso adotado	107
Quadro 10 - Modelagem da ventilação natural no módulo AFN.	109
Quadro 11 - Casos de estudo relacionados com o impacto da varanda	127
Quadro 12 - Casos de estudo relacionados com o impacto dos dispositivos de sombreamento.....	137
Quadro 13 - Diferenças nos Cps e nas taxas de renovações de ar dos casos com dispositivo de sombreamento horizontal básico (H1) e sem (R), com tamanho de janela intermediária (1x1,6m).	139
Quadro 14 - Diferenças nos Cps e nas taxas de renovações de ar dos casos com dispositivo de sombreamento horizontal afastado (H2) e sem (R), com tamanho de janela intermediária (1x1,6m).	140
Quadro 15 - Diferenças nos Cps e nas taxas de renovações de ar dos casos com dispositivo de sombreamento horizontal tipo veneziana (H3) e sem (R), com tamanho de janela intermediária (1x1,6m).....	141
Quadro 16 - Diferenças nos Cps e nas taxas de renovações de ar dos casos com dispositivo de sombreamento tipo “L” (E1) e sem (R), com tamanho de janela intermediária (1x1,6m).	142
Quadro 17 - Casos de estudos relacionados com o impacto do muro	153
Quadro 18 - Diferenças nos Cps e nas taxas de renovações de ar dos casos com muro (RM) e sem (R), com tamanho de janela intermediária (1x1,6m).	156

Quadro 19 - Diferenças nos Cps e nas taxas de renovações de ar dos casos com varanda mais muro (E2) e com varanda só (E2), com tamanho de janela intermediária (1x1,6m).....	157
Quadro 20 - Resumo dos principais impactos nos Cps, na ventilação natural e nas temperaturas internas pela presença dos elementos estudados.....	15765

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resumo da energia transmitida por superfícies envidraçadas com e sem sombreamento para diferentes orientações. Fonte: Olgyay (1998).....	69
---	----

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Perfil de velocidade correspondentes à CLA na escala do modelo.	102
Gráfico 2 - Representação di-log do perfil da CLA.....	103

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	37
Equação 2	40
Equação 3	41
Equação 4	49
Equação 5	50
Equação 6	61
Equação 7	62
Equação 8	62
Equação 9	65
Equação 10	65
Equação 11.....	102
Equação 12.....	102
Equação 13.....	103
Equação 14.....	112
Equação 15.....	112

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AFN	<i>AirflowNetwork</i>
ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers</i>
CFD	Programa computacional de dinâmica dos fluidos
CLA	Camada Limite Atmosférica
Cp	Coeficiente de pressão
Cps	Coeficientes de pressão
Diferença Ti	Diferença na Temperatura interna do ar
Dpr	Diferença porcentual relativa
EERE	Departamento de Energia Norte-Americano
EP	<i>EnergyPlus</i>
EPW	<i>Energyplus Weather File</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LabEEE	Laboratório de Eficiência Energética em Edificações
NBR	Norma Brasileira
Ren	Taxa de renovação de ar
RTQ-R	Regulamento Técnico Da Qualidade para o Nível De Eficiência Energética Edificações Residenciais
Te	Temperatura externa do ar
Ti	Temperatura interna do ar
<i>Tsetpoint</i>	Temperatura de controle da ventilação

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	29
1.1. Objetivos.....	34
1.1.1. Objetivo geral.....	34
1.1.2. Objetivos específicos	34
1.2. Estrutura da dissertação	34
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	35
2.1. Contextualização	35
2.2. Ventilação natural nas edificações.....	35
2.2.1 Características da ventilação natural no interior das edificações.....	38
2.2.1.1 Ventilação pela ação dos ventos	38
2.2.2. Ventilação natural para o conforto térmico.....	40
2.2.3. Elementos que alteram a ventilação natural no interior das edificações	43
2.2.4. Parâmetros relevantes para o estudo da ventilação natural em edificações pela ação dos ventos	49
2.2.4.1 Taxa de renovação do ar	49
2.2.4.2 Coeficientes de Pressão	49
2.2.5. Fontes para a obtenção do coeficiente de pressão	50
2.2.5.1. Fontes primárias	51
2.2.5.2. Fontes secundárias	51
2.2.6. Método de predição da ventilação natural: modelos de rede.....	53
2.3. Ensaio em túnel de vento	54
2.3.1. Camada Limite Atmosférica (CLA) em túnel de vento	59
2.3.1. 1. Método ativo para simulação da CLA.....	59
2.3.1. 2. Método passivo para simulação da CLA.....	59
2.3.1. Velocidade do vento na CLA.....	61
2.3.2. Equipamentos.....	62
2.3.2.1. Tubo <i>Pitot</i>	62
2.3.2.2. Anemômetro de fio quente (<i>Constant Temperature Anemometry CTA</i>).....	62
2.3.2.3. Outros instrumentos	63
2.3.3. Modelos reduzidos	64
2.3.4. Definição da escala do modelo	64
2.4. Radiação solar nas edificações	67
2.4.1. Dispositivos de sombreamento.....	68
2.4.2. Representação gráfica dos dispositivos de sombreamento Externos.....	69
2.5. Estudos de referência.....	73

2.5.1. Estudos sobre dispositivos de sombreamento e similares e sua influência na ventilação natural.....	73
2.5.2. Estudos sobre muros e sua influência na ventilação natural	79
2.5.3. Estudos relacionado à ventilação natural e coeficientes de pressão	82
3. MÉTODO	85
3.2.1. Caracterização do clima	86
3.2.2. Edifício de estudo	88
3.2.3. Elementos externos à fachada	90
3.2.3.1 Categoria: dispositivos de sombreamento horizontais.....	91
3.2.3.2 Categoria: dispositivos de sombreamento especiais.....	93
3.2.3.3 Categoria: muro de fechamento.....	95
3.2.4. Casos de estudos	95
3.3.1.1 Descrição do Túnel de Vento de CLA do IPT de São Paulo	97
3.3.1.2 Construção do modelo.....	98
3.3.1.3. Período de ensaios.....	101
3.3.1.4 Cálculo dos coeficientes de pressão.....	104
3.3.2. Fase 2- Simulações computacionais	105
3.3.2.1. Descrição do programa <i>EnergyPlus</i>	105
3.3.2.2. Modelagem do edifício	106
3.3.2.3. Modelagem da ventilação natural	108
3.4.1. Impacto na ventilação natural.....	111
3.4.2. Impacto nas temperaturas internas	111
3.4.2.1. Descrição do índice de conforto adaptativo	111
3.4.3. Elaboração de recursos gráficos	113
4. RESULTADOS	115
4.1. Análise comparativa dos coeficientes de pressão.....	117
4.1.1. Coeficientes de pressão nas janelas sem elementos externos.....	117
4.1.2. Impacto dos dispositivos de sombreamento horizontais nos coeficientes de pressão.....	119
4.1.3. Impacto do dispositivo de sombreamento tipo “L” nos coeficientes de pressão.....	122
4.1.4. Impacto da varanda nos coeficientes de pressão	122
4.1.5. Impacto do muro nos coeficientes de pressão	123
4.1.6. Diferenças nos coeficientes de pressão entre janelas opostas	124
4.2. Influência da varanda.....	127
4.2.1. Impacto nos coeficientes de pressão.....	127
4.2.2. Impacto no fluxo de ar.....	128
4.2.2.1 Períodos de ventilação	128

4.2.2.2 Diferenças na taxa de renovação de ar.....	129
4.2.3. Impacto nas temperaturas internas.....	131
4.3. Influência dos dispositivos de sombreamento horizontais e tipo "L"	137
4.3.1. Ventilação natural.....	137
4.3.1.1. Impacto nos coeficientes de pressão e no fluxo de ar	137
4.3.2. Impacto no desempenho térmico	144
4.4. Influência do muro.....	153
4.4.1. Impacto no fluxo de ar	153
4.4.1.1. Períodos de ventilação.....	153
4.4.1.2 Diferenças na taxa de renovação de ar.....	154
4.4.2. Sombreamento devido ao muro	159
4.4.3. Impacto nas temperaturas internas do ar	159
4.5. Considerações finais	165
4.5.1. Impacto dos dispositivos de sombreamento horizontais e tipo "L"	166
4.5.2. Impacto da varanda	167
4.5.3. Impacto do muro.....	167
5. CONCLUSÕES	169
5.1. Sugestões para trabalhos futuros	171
REFERÊNCIAS	173

1. INTRODUÇÃO

Em climas quentes e úmidos, a adoção conjunta da ventilação natural e de dispositivos de proteção solar representa uma importante estratégia de projeto para se alcançar um melhor desempenho térmico das edificações, reduzindo ou até eliminando o uso de condicionamento mecânico (CÂNDIDO et al., 2010). A necessidade da adoção conjunta destas estratégias de condicionamento passivo é reforçada pela norma NBR 15220 Desempenho Térmico de Edificações Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social (ABNT, 2005c-3), uma vez que ela recomenda a ventilação natural em sete das oito zonas bioclimáticas (zonas 2 a 8), e o sombreamento em cinco delas.

A principal finalidade da ventilação natural nestes climas é a promoção do conforto térmico dos usuários, a partir da remoção do calor no interior do edifício e do resfriamento fisiológico ocasionado pela evaporação do suor da pele. A ventilação natural ocorre pelo deslocamento de ar nas edificações a partir de aberturas que podem funcionar como entrada ou saída de ar, sendo este movimento de ar produzido por diferenciais de pressão. Estes diferenciais podem ser decorrentes da ação do vento na envoltória da edificação ou pela diferença de temperatura entre os ambientes internos e externos (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008; SANTAMOURIS, 2007; SANTAMOURIS; ALLARD, 1998; TOLEDO, 1999).

Quanto aos dispositivos de sombreamento, sua função é reduzir o ganho de calor solar das edificações. Esse efeito é ocasionado a partir do bloqueio, por parte destes dispositivos, da radiação direta dos raios solares nas janelas (GIVONI, 1992; OLGAY, 1998). Sua eficiência é determinada pelo tipo de dispositivo de proteção (externo, interno ou intermediário). Para Olgay (1998), os dispositivos, quando colocados no exterior, apresentam melhor desempenho, uma vez que bloqueiam a passagem dos raios solares antes destes atingirem as superfícies transparentes ou translúcidas da edificação. No entanto, a proximidade desses elementos às aberturas pode afetar os picos e as médias das pressões exercidas pelo vento nas superfícies da edificação (CÂNDIDO; BITTENCOURT, 2008; GIVONI, 1992; MARUTA; KANDA; SATO, 1998; MONTAZERI; BLOCKEN, 2013).

Quando a ventilação natural é ocasionada pela ação dos ventos nas edificações, as distribuições das pressões do vento nas faces externas do edifício

variam de acordo com seu ângulo de incidência, velocidade, a geometria do corpo e a presença de obstruções adjacentes que possam perturbar as características do fluxo incidente. Um exemplo destas obstruções, além dos dispositivos de sombreamento externos, pode ser os anteparos localizados no entorno imediato, como os muros (CÂNDIDO; BITTENCOURT, 2008; CÓSTOLA et al., 2010; FROTA; SCHIFFER, 2001; GIVONI, 1992; SANTAMOURIS, 2007; SANTAMOURIS; ALLARD, 1998).

Algumas configurações de dispositivos externos horizontais e verticais podem gerar distintos diferenciais de pressão na envoltória, intensificando ou atenuando a ventilação natural no interior do ambiente (SANTAMOURIS; ALLARD, 1998). Olgyay (1998) e Cândido e Bittencourt (2008) destacam que o uso de projeções horizontais na parte superior das aberturas produz um deslocamento do ar para cima da edificação. Entretanto, pequenas modificações nos dispositivos de proteção solar horizontais, como afastá-los da fachada podem produzir mudanças nas pressões ao redor das aberturas e acarretar um deslocamento descendente do fluxo de vento no interior do edifício. Outras composições realizadas a partir de elementos porosos (tipo veneziana) produzem distribuições mais uniformes do vento.

Na literatura científica, existem vários estudos que abordam o impacto na ventilação natural ocasionado pela presença de detalhamentos na fachada. Hien e Istiadji (2003), por exemplo, avaliaram conjuntamente o impacto de variadas geometrias de dispositivos de proteção solar externos, na iluminação e na ventilação natural em uma edificação residencial em Cingapura. Os autores concluíram que o uso dos dispositivos de sombreamento reduziram a velocidade do fluxo do vento no interior da edificação, no entanto, estas reduções não foram tão expressivas. A faixa de variação registrada foi da ordem de 1,5% (para o dispositivo tipo pérgola) até 5% (para os dispositivos compostos por superfícies que combinam horizontal mais vertical em ambos os extremos da janela). Em relação à temperatura interna, a redução desta esteve na faixa de 0,5°C a 1°C.

Chand e Krishak (1971), por outro lado, analisaram o impacto de diferentes configurações de dispositivos de sombreamento na velocidade e distribuição do vento em um modelo cúbico. Os resultados mostraram que, para todos os casos, houve mudanças na velocidade e na distribuição do vento. A geometria de dispositivo de sombreamento tipo "L", que combinou superfícies verticais e horizontais, destacou-se por apresentar um aumento nas velocidades do vento

para ângulos de incidência de 0° até 90°. Outro estudo que avalia este impacto foi o realizado por Bittencourt, Biana e Cruz (1995). Neste estudo foi utilizado um modelo de geometria simples (6m X 6m X 3m). Foi observado que para as configurações tipo veneziana, reduzir o espaçamento entre as placas horizontais que compõe estes dispositivos, produz uma diminuição da velocidade do ar, mas promove uma melhor distribuição do fluxo de ar no interior dos ambientes.

Kindangen, Krauss e Depecker (1997) e Prianto e Depecker (2002), analisaram o uso da varanda como elemento arquitetônico que, além de outras funções, possui comportamento semelhante aos dispositivos de proteção solar do ponto de vista da proteção contra à incidência da radiação solar direta. Para Kindangen, Krauss e Depecker (1997) as projeções dos telhados tipo beirais, varandas ou similares podem aumentar a velocidade do vento no interior em torno de 22 até 39% para ângulos de incidência do vento de 0°. Para Bittencourt e Cândido (2008), um dos efeitos na ventilação natural ocasionado pelo uso das varandas nas edificações térreas é desviar parte do fluxo que iria para cima da construção ao interior dos ambientes.

O estudo realizado por Prianto e Depecker (2002) demonstrou que diferentes configurações de paredes internas e tipo de abertura exercem uma grande influência no fluxo do ar interno e também na velocidade e na direção do vento no interior. Alguns dos casos destacados por registrarem as maiores velocidades do ar no interior da edificação foram os que combinaram janelas tipo veneziana (composta por aletas horizontais) e os casos com janelas pivotantes com sua folha inclinada a 45°.

Chand, Bhargava e Krishak (1998) e de Montazeri e Blocken (2013) analisaram os efeitos que a presença de sacadas em uma edificação de cinco andares resultou na ventilação natural por ação dos ventos. Ambos os estudos utilizaram dados provenientes de ensaios em túnel de vento para a análise da distribuição das pressões do vento nas fachadas a barlavento e a sotavento. Os resultados do estudo de Chand, Bhargava e Krishak (1998) apontaram maiores alterações ocasionadas pelas sacadas na fachada voltada a barlavento, que nas zonas a sotavento da edificação. Quanto ao estudo realizado por Montazeri e Blocken (2013), estes compararam as medições realizadas por Chand, Bhargava e Krishak (1998) com medições em programa de simulação computacional de dinâmica dos fluidos (*Computational Fluid Dynamics – CFD*). Os resultados mostraram uma boa

concordância entre os valores das pressões do vento das zonas a barlavento do modelo com e sem sacadas. No entanto, para ventos oblíquos, os resultados mostraram discrepâncias.

Por outro lado, os muros são frequentemente adotados em tipologias habitacionais por razões de segurança, privacidade ou de demarcação de propriedade (MALARD et al., 2002; STREET; COMMUNITIES, 2016; TRAMONTANO; SANTOS, 2003). Chang (2006) e Chang e Cheng (2009) analisaram os efeitos na ventilação natural para diferentes porcentagens de porosidade de um fechamento (cerca viva) na frente de duas configurações de edifícios (habitação térrea e de dois pavimentos, ambas isoladas). Os resultados apontaram que de acordo com as diferentes porcentagens de porosidade do muro, este elemento conseguiu modificar o comportamento do fluxo do vento e conseqüentemente, alterar a ventilação natural no interior da edificação. Em geral, os resultados apresentados por estes estudos, demonstraram que houve variações tanto para a velocidade do ar, quanto para a trajetória do vento no interior das edificações. Destacando-se a existência de um índice de porosidade crítico do muro, no qual, a ventilação natural no interior dos ambientes foi estagnada (CHANG, 2006; CHANG; CHENG, 2009).

Os estudos na área têm demonstrado alterações no desempenho da ventilação natural no interior das edificações pela presença de elementos externos às fachadas. Contudo, são poucas as investigações que abordam o impacto destes elementos (dispositivos de sombreamento e muro) na distribuição das pressões nas fachadas. A grande maioria dos estudos sobre este parâmetro são efetuados em modelos simples (com superfícies planas), que não incluem detalhes nas fachadas (MARUTA; KANDA; SATO, 1998; MONTAZERI; BLOCKEN, 2013).

Os coeficientes de pressão (Cps) são comumente adotados como parâmetros quantitativos para a análise da pressão do vento sobre uma edificação. Estes coeficientes caracterizam as pressões em diferentes pontos da superfície de um corpo pela ação do vento, e são independentes do tamanho do mesmo. Além disso, os Cps são dados relevantes para o cálculo do potencial de remoção do calor dos ambientes pela ventilação natural nos modelos de rede¹ dos programas de simulação do desempenho de edificações. As vantagens do uso destes

¹ O modelo de rede calcula a taxa de renovações de ar nos ambientes da edificação, devido à ação dos ventos, através das aberturas dispostas na envoltória externa (janelas, portas, e frestas). Cada zona térmica é caracterizada por um nó de pressão, o qual é interligado aos das demais zonas e aos nós de pressão externos.

programas é a possibilidade de comparação de diferentes cenários, facilitando variar parâmetros do edifício e seus sistemas nas etapas iniciais do projeto arquitetônico, auxiliando desta forma a tomada de decisões dos profissionais (ABNT, 2005a; MENDES et al., 2005).

Deste modo, o presente trabalho tem como finalidade avaliar os impactos de diferentes dispositivos de sombreamento externos e do muro no desempenho térmico de uma habitação térrea em um clima quente e úmido, através dos impactos na ventilação natural, e nas temperaturas internas do ar e/ou no conforto. Foram realizadas para este fim, simulações computacionais no programa *EnergyPlus*. Tal programa, além de ser amplamente reconhecido é avaliado pela ASHRAE-140 (SPITLER; XIAO; REES, 2002; ASHRAE Standard 140, 2004). Este utiliza o módulo *AirflowNetwork* para o cálculo da ventilação natural baseado no modelo de rede (EERE, 2012). Para a obtenção de Cps requeridos para o devido funcionamento desta ferramenta, foram realizados ensaios em túnel de vento de Camada Limite Atmosférica (CLA). Esta fonte de obtenção de Cps é considerada de primeira ordem e uma das mais confiáveis para este propósito (CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009). Os dados de Cps oriundos do túnel de vento de CLA, além de serem usados como dados de entrada para as simulações, permitiram realizar análises do impacto destes elementos nos valores de Cp em si, de forma que, auxiliassem o entendimento dos fenômenos observados derivados dos resultados das simulações.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo geral

Avaliar o impacto de elementos externos à fachada de uma habitação de interesse social térrea tanto nas renovações de ar devido à ação dos ventos quanto nas temperaturas interiores. Esses elementos são distintos dispositivos de sombreamento externos e um muro localizado no perímetro do terreno.

1.1.2. Objetivos específicos

- Avaliar o impacto da inclusão de elementos externos à fachada (dispositivos de sombreamento e muro) nos coeficientes de pressão da envoltória da habitação, através de ensaios em túnel de vento.
- Avaliar o efeito conjugado de estratégias de condicionamento passivas (o sombreamento e a ventilação) em habitações de climas quentes e úmidos.

1.2. Estrutura da dissertação

O primeiro capítulo está composto pela introdução e justificativa, bem como os objetivos geral e específicos. O segundo capítulo refere-se à revisão bibliográfica que contem as temáticas relevantes desta pesquisa. No terceiro capítulo é descrita a metodologia seguida. No quarto são apresentados os resultados agrupados em seções independentes, mas que configuram um conjunto de ideias articuladas. O quinto capítulo apresenta as conclusões e propõe sugestões para trabalhos futuros. Por último, são apresentadas as referências bibliográficas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo inclui a revisão da literatura científica que engloba temáticas relevantes para a contextualização da problemática levantada por esta pesquisa. Assim, o texto discerne sobre estratégias de condicionamento passivas das edificações, como a ventilação natural e o controle da radiação solar por meio de dispositivos de sombreamento. Além disso, discute sobre as principais implicações da integração de ambas as estratégias e dá destaque a metodologias de estudo da ventilação natural relacionadas a programas de simulação do desempenho energético de edificações.

2.1. Contextualização

É sabido da necessidade do uso de estratégias de condicionamento passivas para melhorar o desempenho térmico das edificações em regiões de climas quentes e úmidos. Nestes cenários, o uso conjugado da ventilação natural e dos dispositivos de sombreamento se apresenta como uma alternativa viável. No entanto, existem poucas informações na literatura científica acerca do impacto de elementos externos à fachada na ventilação natural, a partir de avaliações dos parâmetros quantitativos.

2.2. Ventilação natural nas edificações

Para entender a ventilação natural é necessário primeiramente compreender o deslocamento das massas de ar na superfície da Terra. Estas ocorrem devido às alterações nas condições de pressão e temperatura da atmosfera, decorrentes do aquecimento não uniforme do ar, devido à radiação solar (AZZI PITTA, 2001; FROTA; SCHIFFER, 2001; OLGAYAY, 1998). Uma vez que as massas de ar estão em movimento, as circulações das correntes do vento são determinadas pelo movimento de rotação da Terra; também conhecido como força de Coriolis. Já em níveis superficiais da atmosfera estas forças são atenuadas pelo atrito do ar contra a superfície da Terra.

Assim, o vento das baixas altitudes da atmosfera interage com as obstruções do terreno (acidentes geográficos, altura do terreno, dimensão, densidade e forma dos obstáculos), o que conforma sua rugosidade superficial. Estas obstruções, por sua vez, determinam os níveis de turbulência, direção e velocidade atingidos pelos

ventos em uma determinada região (AZZI PITTA, 2001; CÂNDIDO; BITTENCOURT, 2008). Segundo Olgyay (1998), o entendimento destes fenômenos ajuda a um melhor planejamento das cidades e dos projetos arquitetônicos, a partir do aproveitamento das condições naturais e ambientais do território.

A Norma NBR 6123 sobre Forças Devidas ao Vento em Edificações (ABNT, 1988), classifica a rugosidade dos terrenos em 5 grupos, a saber:

- Categoria I: áreas de terrenos lisos e de grande extensão (mais de 5 km). Exemplos: mar calmo; lagos e rios; pântanos sem vegetação.
- Categoria II: área de terrenos abertos em nível, com poucos obstáculos isolados (média de altura dos obstáculos inferior ou igual a 1,0 m). Exemplos: zonas costeiras planas; pântanos com vegetação rala; campos de aviação; pradarias e charnecas; fazendas sem sebes ou muros.
- Categoria III: área de terrenos planos ou ondulados com obstáculos isolados (média de altura dos obstáculos igual a 3,0m). Exemplos: granjas, fazendas e casas de campo; subúrbios a considerável distância do centro, com casas baixas e esparsas.
- Categoria IV: área de terrenos cobertos por obstáculos numerosos e pouco espaçados, em zona florestal, industrial ou urbanizada (média de altura dos obstáculos igual a 10m, também inclui zonas com obstáculos maiores e que ainda não possam ser consideradas na categoria V). Exemplos: zonas de parques e bosques com muitas árvores; cidades pequenas e seus arredores; subúrbios densamente construídos de grandes cidades; áreas industriais plena ou parcialmente desenvolvidas.
- Categoria V: área de terrenos cobertos por obstáculos numerosos, grandes, altos e pouco espaçados (média de altura dos obstáculos igual ou maior a 25m). Exemplos: florestas com árvores altas, de copas isoladas; centros de grandes cidades; complexos industriais bem desenvolvidos.

Um conceito fundamental para o estudo da ventilação natural é a velocidade gradiente. A Figura 1 ilustra o gradiente de vento para diferentes rugosidades de terrenos. Esta designa a faixa de variação nas acelerações do

vento no eixo vertical da atmosfera terrestre. A velocidade do vento nesta faixa varia desde 0 km/h no nível do terreno até o ponto onde o movimento do ar não apresenta perturbação pela rugosidade superficial da Terra (movimento laminar). Este espaço na atmosfera é denominado Camada Limite Atmosférica (CLA), normalmente presente entre os 250 e 600 metros variando de acordo com a rugosidade superficial terrestre. Sendo a altura gradiente maior quanto maior for a rugosidade superficial (CÂNDIDO; BITENCOURT, 2008; AZZI PITTA, 2001).

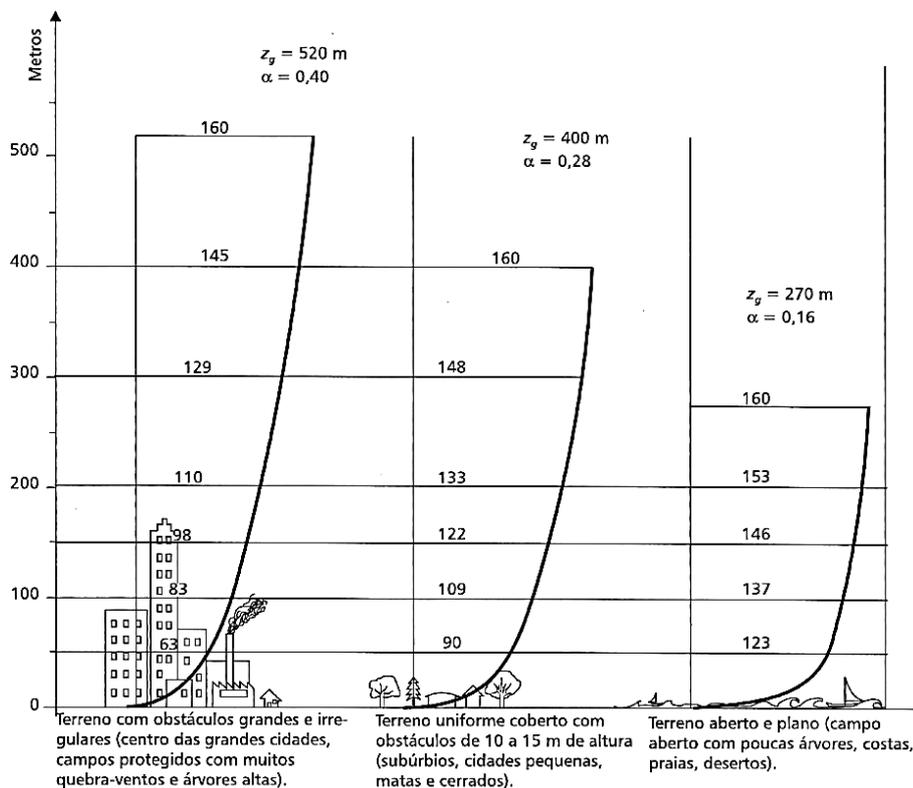


Figura 1 - Perfis de velocidade média do vento de acordo com a rugosidade do terreno (Km/h). Fonte: Azzi Pitta(2001).

Para determinar a velocidade média do vento (v_z) segundo a lei exponencial de Davenport é dada pela Equação 1:

$$V = V_{\text{ref}} \left(\frac{Z}{Z_{\text{ref}}} \right)^{\alpha} \text{ Equação 1}$$

Onde: V: velocidade média do vento em certa altura h (m/s); Vref: velocidade do vento medida na altura de referência (m/s); Z: altura da edificação que se deseja avaliar a velocidade do vento (m); Zref: altura de referência da velocidade do vento; e α : coeficiente de rugosidade do terreno (entorno).

Para entender o comportamento do vento é importante conhecer os conceitos aerodinâmicos relacionados ao fluxo do ar. Este fluxo pode ser dividido em laminar ou turbulento, o que permite caracterizar o tipo do movimento do escoamento. Os fluxos laminar e turbulentos são classificados segundo o Número Reynolds. No primeiro caso, as moléculas do ar tendem a manter um curso paralelo de escoamento, sem alterações laterais nem choques entre si. No segundo caso, o movimento é caracterizado por uma trajetória acelerada acompanhada de vórtices e ar em recirculação após o impacto com corpos imerso no fluido (CÂNDIDO; BITTENCOURT, 2008). O movimento do ar turbulento é caracterizado por uma maior taxa de perda de energia e, como consequência, produz maior força de arrasto e perda de pressão (SANTAMOURIS; ALLARD, 1998). Segundo Santamouris e Wouters (2006), apesar dos avanços de conhecimento sobre o fluxo turbulento, este tópico ainda requer maior compreensão devido à sua complexidade.

2.2.1 Características da ventilação natural no interior das edificações

A ventilação natural nas edificações ocorre quando o fluxo de ar atinge o interior da edificação por meio das aberturas na envoltória, incluindo rachaduras ou fissuras. O movimento do ar no interior das edificações é produzido por diferenciais de pressão. Desta forma, o movimento é decorrente do diferencial de temperatura (pressão estática) ou pela ação dos ventos (pressão dinâmica) podendo estas duas forças trabalhar independentes ou em conjunto. O enfoque deste trabalho está baseado na ventilação natural pela ação dos ventos.

2.2.1.1 Ventilação pela ação dos ventos

Se um corpo está imerso em uma corrente de vento laminar, ocorrerão alterações na trajetória previsível do fluido o que acarreta a aparição de campos de pressão nas superfícies do objeto (Figura 2). As faces perpendiculares ao sentido do escoamento são chamadas de barlavento, com uma força de empurre na superfície. As faces opostas ou laterais de sotavento, com um efeito de sucção (CÂNDIDO; BITTENCOURT, 2008; BARROS FROTA; RAMOS SCHIFFER, 2001). O efeito de sucção é definido como a pressão abaixo da pressão atmosférica de referência (ABNT, 1988).

O comportamento do escoamento do vento, em torno de um corpo pode ser agrupado em três tipos (Figura 3): (1) corrente livre, que é a parte do escoamento do vento localizada a barlavento; (2) camada limite, onde ocorre a separação entre o fluxo livre e a região de recirculação do escoamento, e (3) região de recirculação, caracterizada por uma zona turbulenta com vórtices e refluxos de baixa velocidade, também chamada região de esteira ou sombra do vento (CÂNDIDO; BITTENCOURT, 2008).

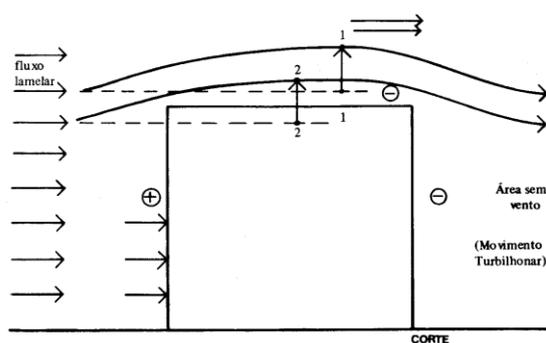


Figura 2 - Distribuição das pressões ocasionadas pela força dos ventos. Fonte: Frota e Schiffer (2001).

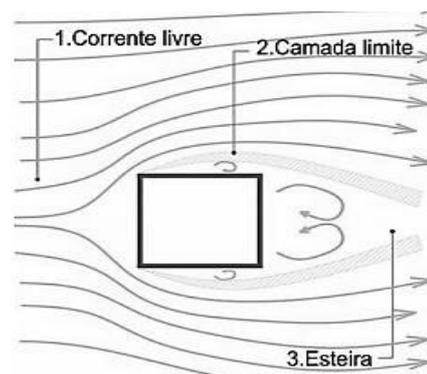


Figura 3 - Esquema em planta das três zonas formadas no escoamento do vento em torno de um corpo. Fonte: Cândido e Bittencourt (2008).

Nas construções as distribuições das pressões do vento nas faces de um corpo variam com a direção, velocidade, ângulo de incidência do vento, assim como a presença de obstruções adjacentes que possam perturbar o curso inicial do ar (FROTA; SCHIFFER, 2001). Para estudos sobre a ação dos ventos nas edificações as aberturas com função de entrada de ar são designadas com pressões positivas (a barlavento) e as de saídas com pressões negativas (a sotavento ou laterais) (FROTA; SCHIFFER, 2001). A Figura 4 exemplifica a trajetória do fluxo de vento no interior da edificação gerado pela ação dos ventos (pressões positivas e negativas).

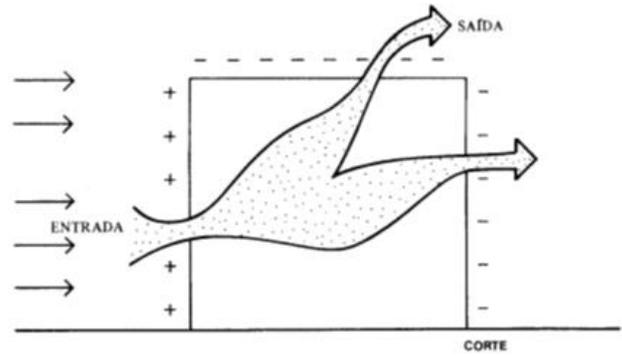


Figura 4 - Ventilação por ação dos ventos (pressões positivas e negativas). Fonte: Frota e Schiffer (2001).

O fluxo da ventilação devido à ação dos ventos pode ser calculado pela Equação 2 (FROTA; SCHIFFER, 2001).

$$\Phi_v = c_a \cdot A_o \cdot v \sqrt{(c_e - c_s)} \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad \text{Equação 2}$$

Onde Φ_v é o fluxo ou vazão de ar pela ação dos ventos (m^3/s); c_a é o coeficiente de perda de carga por ação dos ventos (0,6); A_o a área equivalente das aberturas (m^2); v é a velocidade do vento externo resultante na abertura (m/s); c_e é o coeficiente de pressão da abertura de entrada de ar; e c_s é o coeficiente de pressão da abertura de saída de ar.

2.2.2. Ventilação natural para o conforto térmico

O corpo humano libera calor constantemente pelos processos metabólicos, mediante trocas de calor com o meio ambiente. A quantidade de calor emitida depende da taxa metabólica relacionada com a atividade física (FROTA; SCHIFFER, 2001; SZOKOLAY, 2004). Para Barros Frota e Ramos Schiffer (2001), quando as condições ambientais produzem sensação de frio ou calor, o mecanismo de termorregulação é ativado no organismo humano, com a intenção de levar à normalidade a temperatura interna, requerendo para isto um esforço extra. Este esforço maior pode ocasionar nas pessoas sensação de desconforto, trazendo problemas de saúde, baixa produtividade, sensação de fadiga e estresse. Portanto, para os mesmos autores a sensação de conforto é gerada quando é possível manter a temperatura interna ideal do corpo humano (da ordem de 37°C) sem necessidade do mecanismo de termorregulação. Para a norma ASHRAE standard 55 (2013) o conforto térmico é definido como o estado do espírito que expressa satisfação com o meio ambiente variando com as condições físicas e psicológicas, e de pessoa a pessoa. Para esta mesma norma, os parâmetros que influenciam o

conforto térmico podem ser de caráter humano (taxa metabólica e vestimenta) ou pelo meio ambiente (temperatura radiante, umidade, temperatura e velocidade do vento). Baseado nesses parâmetros e a partir das hipóteses que as pessoas se adaptam a seu entorno; desenvolveu-se o método do índice de conforto adaptativo adotado pela *ASHRAE Standard 55 (2013)* (ver item 3.4.2.1), que define as condições necessárias para uma porcentagem de pessoas termicamente confortáveis em ambientes naturalmente ventilados (*ASHRAE standard 55, 2013; DEAR; G.S. BRAGER, 2002*).

Para diferentes autores a ventilação natural no interior das edificações tem dois objetivos principais: o primeiro é garantir uma boa qualidade de ar no interior das edificações, uma vez que atua na eliminação de agentes contaminantes. O segundo é promover o conforto térmico dos ocupantes nas edificações, seja pelo efeito direto de remoção de calor dos usuários, ou pelo resfriamento da estrutura produto da convecção, quando a temperatura do ar externo é menor que a do interior (ventilação noturna). Este último é resultado da melhoria na qualidade dos ambientes internos (CÂNDIDO; BITTENCOURT, 2008; FISK; ROSENFELD, 1997; FROTA; SCHIFFER, 2001; GIVONI, 1976; JEFFE; WESTPHAL, 2014; YARKE, 2005).

No entanto, Givoni (1976) ressalta que embora a ventilação natural para garantir uma boa qualidade do ar deva ser assegurada independente das condições do clima no local, a ventilação para conforto térmico e resfriamento estrutural deve ser estimada. Assim, a principal finalidade da ventilação para o conforto consiste na melhor dissipação de calor do corpo humano a partir do resfriamento fisiológico promovido pela evaporação do suor da pele. O aumento da velocidade do ar eleva a capacidade de perda de calor por convecção, o que pode amenizar os efeitos da alta umidade na pele principalmente quando a alta temperatura se soma a uma elevada umidade relativa (GIVONI, 1976).

Segundo Cândido e Bittencourt (2008), a perda de calor decorrente da ventilação natural pode ser explicada pela Equação 3:

$$Q_v = 1300 V (t_i - t_e) \text{ Equação 3}$$

Onde Q_v é a taxa de perda ou ganho de calor (w), 1300 é o calor específico do ar (J/m^3 °C), V é taxa de renovação do ar (m^3/s), t_i é temperatura interna do ar (°C), e t_e é a temperatura externa do ar (°C).

Para Santamouris e Allard (1998); Cândido e Bittencourt (2008), o uso da ventilação natural nas edificações é uma ferramenta atrativa para os profissionais por se tratar de uma estratégia bioclimática sustentável e eficiente para atingir conforto aos usuários em ambientes urbanos e arquitetônicos. Tal estratégia é especialmente interessante em climas quentes e úmidos, já que o calor é uma das principais causas de desconforto em tais regiões. Para Cândido e Bittencourt (2008), o uso da ventilação reduz a necessidade do uso de ar condicionados, e exemplifica soluções de baixo custo aos problemas de conforto térmico nas edificações. Segundo Yarke (2005), apesar que existam algumas diferenças entre estudiosos sobre quais são os parâmetros climáticos básicos para uma ventilação natural eficiente, esta pode ser otimizada quando:

- As médias das temperaturas externas não são superiores à faixa de 29°C a 32°C.
- A amplitude térmica no dia não é menor que 10°C
- A umidade do ar se manter abaixo dos 90% durante todo decorrer do dia
- A velocidade média dos ventos não é inferior a 7,2km/h (2m/s).

Para outros autores a eficácia da ventilação natural como estratégia passiva pode se resumir em três condições, a saber: Umidade, velocidade e temperatura do ar (GIVONI, 1992; NICOL, 2004). Nicol (2004) considera a velocidade do vento um fator determinante para o conforto em climas tropicais, já que ativa as trocas de calor por convecção. Este autor realizou estudos de medições que permitiram estabelecer a relação entre a velocidade do ar e seu impacto no conforto térmico. A Figura 5 apresenta a relação entre a velocidade do ar e o conforto térmico.

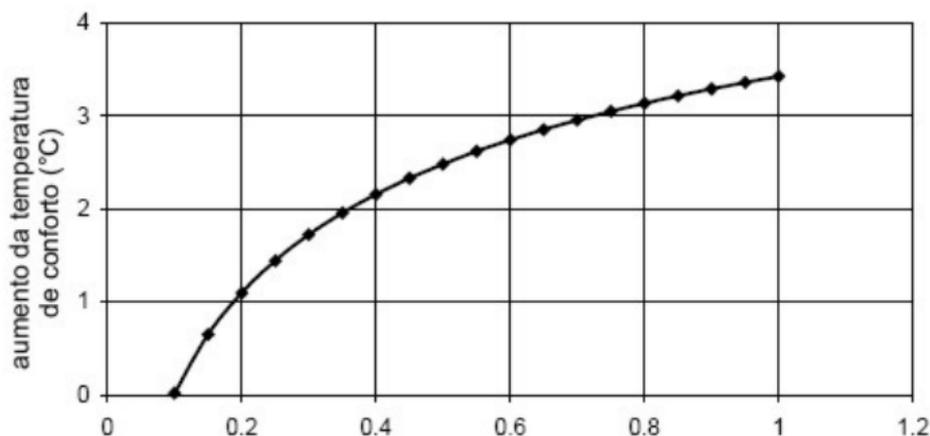


Figura 5 - Gráfico do aumento da temperatura de conforto em relação à velocidade do ar. Fonte Nicol (2004).

Autores como Givoni (1992) e Cândido e Bittencourt (2008), concordam que para regiões quentes são aceitáveis velocidades do ar maiores que 2m/s especialmente em edificações residenciais. Neste sentido o Índice de Conforto Adaptativo da ASHRAE *Standard 55* (2013), estabelece limites superiores maiores de aceitabilidade para velocidades maiores (velocidades médias do ar > 0,3 m/s, e <1,2 m/s, chegando a um incremento da ordem de 1,3 até 2,2°C acima do limite superior). Esclarecendo que, o usuário deve ter acesso à operabilidade das janelas e os valores de velocidade do ar são menores que os recomendados por outros autores.

2.2.3. Elementos que alteram a ventilação natural no interior das edificações

Como já foi dito, as características do vento que chegam às aberturas de uma edificação estão diretamente relacionadas com as condições locais do clima. No entanto, para Cândido e Bittencourt (2008), as características do vento no interior estão condicionadas às particularidades dos ambientes internos e disposição de elementos próximos às janelas. Estes fatores são importantes de serem considerados quando a ventilação natural é utilizada como estratégia de conforto passivo. Para vários autores as características do fluxo de ar no interior das edificações são resultantes de quatro fatores, a saber: (a) tipologia de abertura, (b) tamanho, forma e posicionamento das aberturas, e (c) localização de elementos arquitetônicos próximos às aberturas e (d) entorno imediato (BITTENCOURT; CÂNDIDO, 2008; FROTA; SCHIFFER, 2001; GIVONI, 1976; OLGAY, 1998).

a. Tipologia de abertura

Os critérios para escolha da tipologia de abertura a utilizar são variados (ventilação, iluminação natural, controle do som, da chuva, custos, paisagem e estéticos). No entanto, do ponto de vista da ventilação natural para conforto, qualquer que seja a esquadria elegida, esta deve ter um alto grau de área efetiva de abertura. Outra função das esquadrias está relacionada com o redirecionamento do fluxo de ar, como por exemplo, o uso de elementos vazados, venezianas, ou pelo tipo de abertura das folhas das janelas (batentes, basculantes); o importante nestes casos é considerar sempre a resistência oferecida pelas

esquadrias ao movimento do ar. A Figura 6 e 7 ilustram a regulação do fluxo do ar através de venezianas móveis e o desempenho das janelas basculantes com venezianas respectivamente.

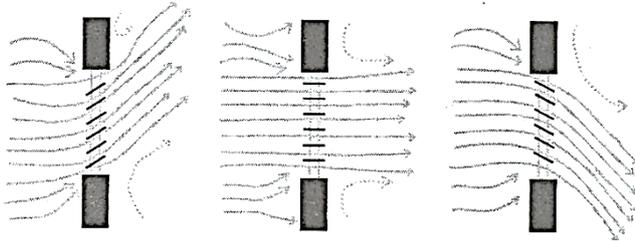


Figura 6 - Regulação do fluxo do ar através de venezianas móveis. Fonte: Boutet 1987, apud Cândido e Bittencourt (2008).

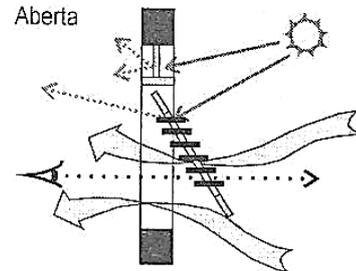


Figura 7 - Desempenho das janelas basculantes com venezianas. Fonte: Cândido e Bittencourt (2008).

b. Tamanho, forma e posicionamento das aberturas

Para vários estudiosos, estes parâmetros são considerados um dos principais fatores que caracterizaram os fluxos e velocidades do vento no interior da edificação. Assim, para aberturas maiores a sotavento, espera-se maior velocidade do ar interno explicado pelo efeito Venturi. No caso contrário, de aberturas maiores a barlavento, é produzida uma distribuição mais uniforme do vento no interior embora com menores taxas de ventilação. Tal efeito é resultado de uma transformação de parte da energia cinética em pressão estática ao redor das aberturas de saída (CÂNDIDO; BITTENCOURT, 2008; OLGAYAY, 1998). A Figura 8 apresenta as velocidades internas médias em função da relação do tamanho das aberturas e direção dos ventos para 45° e 90°.

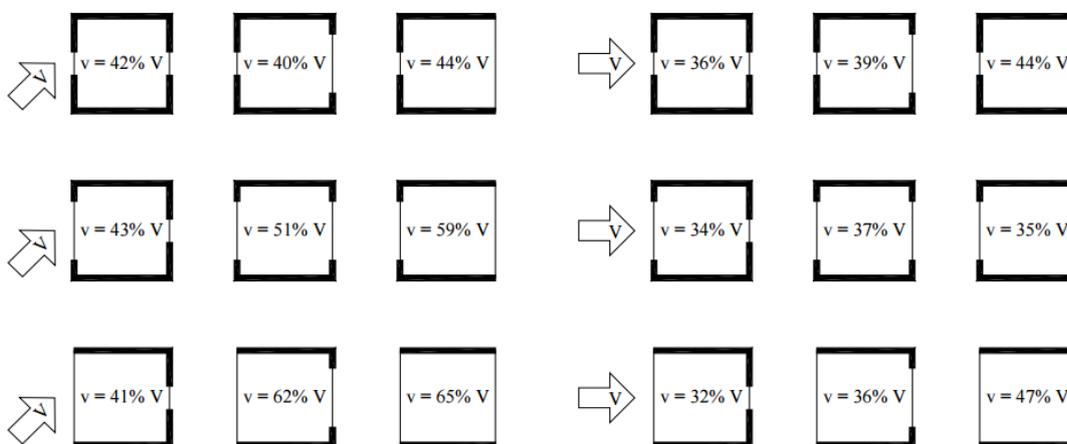


Figura 8 - Velocidade interna média em função da relação do tamanho das aberturas e direção dos ventos para 45° e 90°. Fonte: Givoni (1976).

A porcentagem de porosidade (razão da área total de aberturas pela área de parede) na envoltória das edificações também modifica as velocidades e distribuição interna do ar. Para Cândido e Bittencourt (2008), quanto maior a porosidade da edificação, maiores serão as médias das velocidades do ar atingidas e maior a uniformidade das velocidades no interior. Quanto à forma, as aberturas com formato horizontal produzem uma melhor circulação do ar no ambiente e um maior aproveitamento dos ventos oblíquos, sendo este o formato mais eficiente para o conforto térmico. A Figura 9 relaciona a influência da forma da abertura na velocidade do ar para diferentes ângulos de incidência do vento.

O posicionamento das aberturas na envoltória é outro critério relevante para definir as trajetórias do vento no interior. Para orientações das aberturas com função de entrada próxima à incidência do vento perpendicular é produzida uma maior diferença de pressão, o que força a circulação do ar (ventilação cruzada). É observada também menos perda de energia na ventilação quando as aberturas estão alinhadas. Quando o vento é forçado a mudar de direção, as características do fluxo são mais turbulentas, o que produz uma descida na velocidade do vento. Neste sentido a localização das aberturas de entrada tem mais importância na distribuição do ar interno que as aberturas com função de saída (CÂNDIDO; BITTENCOURT, 2008).

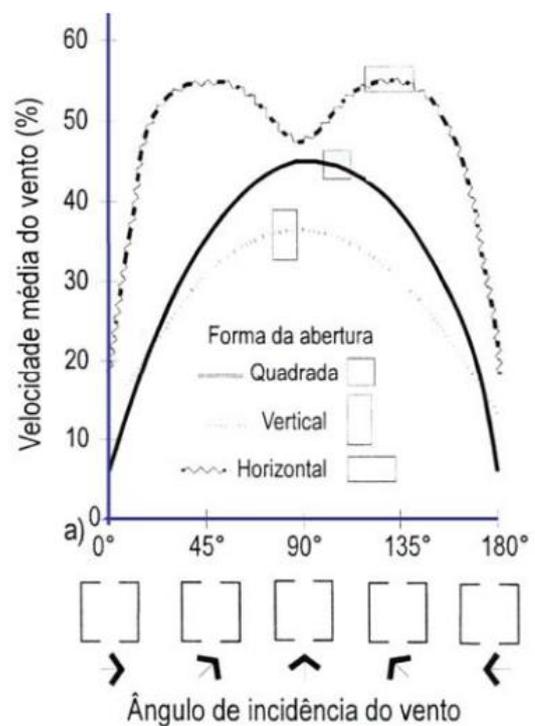


Figura 9 - Influência da forma da abertura na velocidade do ar em diferentes ângulos do vento. Fonte: Sobin (1981), apud Cândido e Bittencourt (2008).

c. Localização de elementos arquitetônicos próximos às aberturas

Pode-se agrupar os elementos próximos às aberturas em superfícies verticais e horizontais. No caso das superfícies verticais são entendidas como um prolongamento externo das paredes internas, pelo uso de dispositivos de

sombreamento ou a presença de elementos estruturais. A resposta das superfícies verticais com respeito à ventilação natural está relacionada com a posição, tamanho dos elementos e com a direção do vento. Estes elementos são distinguidos por serem sensíveis ao ângulo de incidência do vento. A Figura 10 exemplifica a interferência das projeções verticais no fluxo do ar e a Figura 11 apresenta as alterações no fluxo do vento por elementos horizontais.

Neste sentido, o uso de elementos verticais pode criar uma maior diferença nas pressões da envoltória para uma determinada orientação, e em outra se tornar em uma obstrução à entrada das correntes do vento. Para Cândido e Bittencourt (2008), as superfícies verticais podem ser usadas com três objetivos: (1) modificar as pressões ao redor das janelas, (2) configuração do fluxo do vento no interior, e (3) podem funcionar também como captadoras de vento. Quando estes têm a função de captadoras de vento são particularmente eficientes para ventos predominantes com ângulos de incidência oblíquos em relação às aberturas o que acarreta em um aumento na circulação do ar interno pela ventilação cruzada.

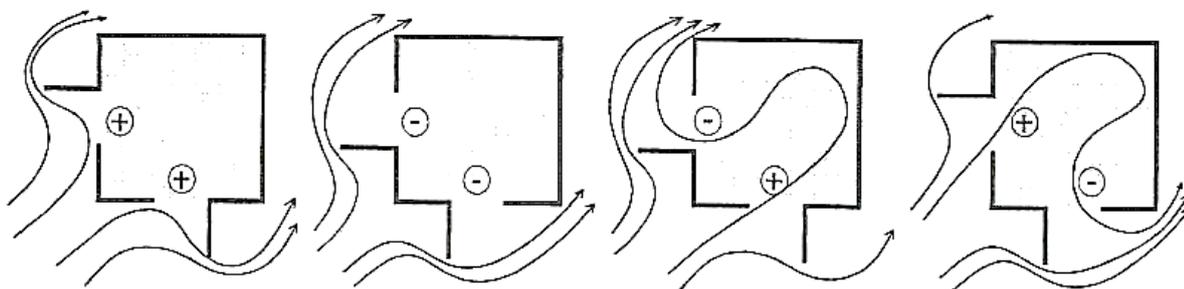


Figura 10 - Projeções verticais podem interferir no fluxo do ar.
Fonte: Freury 1990, apud Cândido e Bittencourt (2008).

As superfícies horizontais podem ser exemplificadas por elementos tais como: dispositivos de sombreamento, marquises, sacadas, beirais e varandas. Estas podem apresentar-se de forma individual ou combinada com superfícies verticais. Para Olgay (1998) e Cândido e Bittencourt (2008), o uso de projeções horizontais logo acima das aberturas produz um deslocamento do ar para cima da edificação. Entretanto, pequenas modificações nos dispositivos de sombreamento horizontais como afastá-los da fachada ou compostos por pequenos elementos consecutivos (tipo veneziana), produzem mudanças nas pressões ao redor das aberturas, o que provoca um redirecionamento descendente do fluxo do vento no interior. Quanto ao uso de beirais extensos e varandas, observa-se um comportamento similar às superfícies verticais de captar o vento para dirigi-lo ao interior, como consequência, é observado um aumento da ventilação natural no interior dos ambientes.

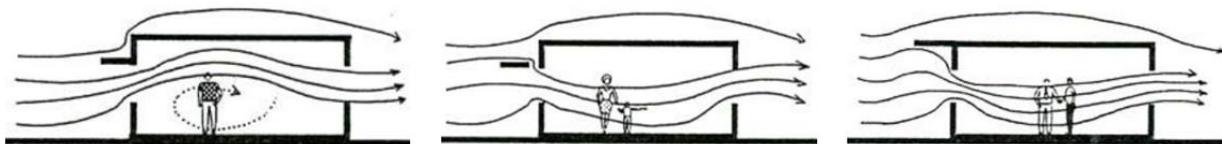


Figura 11 - Elementos horizontais e as alterações no fluxo do ar. Fonte: Olgay (1998).

Por outro lado, as discussões sobre o impacto dos dispositivos de sombreamento externos na ventilação natural têm sido estudadas por variados autores. Em geral, os resultados apresentados por estes, demonstraram que houve variações tanto para velocidade do ar, quanto na trajetória do vento no interior das edificações. No entanto, as variações na aceleração ou diminuição da velocidade do ar foram diferentes para cada caso (CÂNDIDO; BITENCOURT, 2008; CHAND; BHARGAVA; KRISHAK, 1998; CHAND; KRISHAK, 1971; HIEN; ISTIADJI, 2003; PRIANTO; DEPECKER, 2002). Neste sentido, algumas pesquisas na área concluíram que as velocidades do ar no interior podem ser diminuídas entre 10 e 20% dependendo do tamanho da projeção da superfície horizontal (CÂNDIDO; BITENCOURT, 2008). Para outros autores como Chand e Krishak (1971) as variações nas velocidades do ar interior alteradas pelo uso de dispositivos horizontais foram diferentes de acordo com o ângulo de incidência do vento, atingindo para algumas orientações até 5% de redução, sendo observado o efeito contrário para o mesmo dispositivo, mas com outra orientação. Este efeito de aceleração foi encontrado também nos estudos de Olgay, (1998) e Aynley (1988 apud CÂNDIDO; BITENCOURT, 2008). Este último realizado com dispositivos combinados (verticais e horizontais) observou que para ângulos de 0° até 75° houve uma aceleração do vento interno, quando comparado a seu par sem. A Figura 12 apresenta o efeito combinado de elementos verticais e horizontais na velocidade do vento.

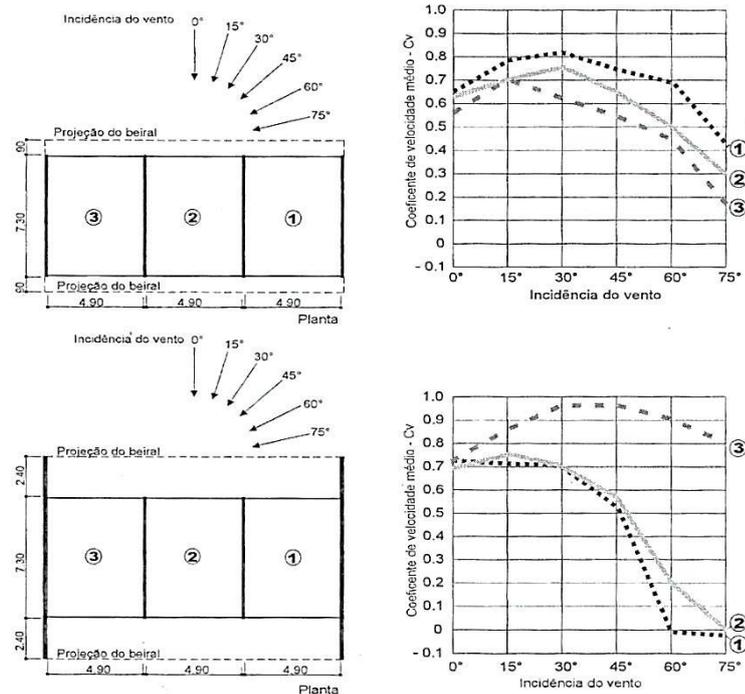


Figura 12 - Efeito combinado de elementos verticais e horizontais na velocidade do vento. Fonte: Aynsley (1977), apud Cândido e Bittencourt (2008).

d. Entorno imediato

As características do entorno próximo às edificações também estabelece uma relação direta com as condições da ventilação natural no interior das edificações. Deste modo, tais características podem ser exemplificadas por: cercas vivas, vegetação, vizinhanças próximas e muros de fechamento. A utilização destes elementos, sob a perspectiva da ventilação natural, acarreta alterações na distribuição das pressões na envoltória das edificações, sendo suas implicações variáveis de acordo com as características climáticas de cada território. Para climas quentes e úmidos, estes elementos podem impactar o aproveitamento do potencial de refrigeração trazido pela ventilação natural. Por outro lado, em climas frios podem ter funções de proteção e controle das velocidades dos ventos indesejados, evitando desta forma perdas de calor das construções (CHANG, 2006; FROTA; SCHIFFER, 2001; LI; WANG; BELL, 2007; LIU; HARRIS, 2008; OLGAYAY, 1998; WANG, 2006).

Em tipologias habitacionais no Brasil é frequente a adoção de muros de fechamentos por razões de segurança, privacidade ou de demarcação de território (MALARD et al., 2002; STREET; COMMUNITIES, 2016; TRAMONTANO; SANTOS, 2003). Neste sentido, o impacto dos muros de fechamento na ventilação natural

pode refletir no desempenho térmico das edificações e conseqüentemente no conforto dos usuários (LI; WANG; BELL, 2007; LIU; HARRIS, 2008; OLGAY, 1998).

2.2.4. Parâmetros relevantes para o estudo da ventilação natural em edificações pela ação dos ventos

Em estudos sobre a ventilação natural para o conforto em edificações são frequentemente adotados parâmetros que auxiliam para o entendimento dos fenômenos ali envolvidos, alguns destes são: taxa de renovação de ar e os coeficientes de pressão.

2.2.4.1 Taxa de renovação do ar

A taxa de renovação do ar indica o número de renovações de um volume de ar que entra ou sai de um espaço dentro de um determinado período de tempo. Esta foi originalmente concebida para estudos de sistemas de climatização mecânicos para resfriamento ou aquecimento, e para indicar a qualidade do ar nos ambientes. Com o tempo foi adotado para estudos de ventilação natural (CÂNDIDO; BITTENCOURT, 2008). A taxa de renovação do ar em programas de desempenho de edificações, é empregada como método para determinar a vazão do fluxo do ar em um ambiente (EERE, 2012). A taxa de renovações pode ser estimada pela Equação 4:

$$T_r = 3600 Q / V \text{ Equação 4}$$

Onde T_r é o número renovações por hora, Q é a Infiltração (m^3/s) e V é o volume do ambiente (m^3).

2.2.4.2 Coeficientes de Pressão

Os coeficientes de pressão (C_p) podem ser definidos como números adimensionais usados em dinâmica dos fluidos para descrever as pressões relativas em um dado ponto $M(x,y,z)$ com referência à pressão dinâmica (P_{dyn}) para uma determinada altura (Z_{ref}) e direção (θ) do vento (SANTAMOURIS; ALLARD, 1998). A Equação 5 determina o valor do coeficiente de pressão (C_p).

$$C_{p_s}(z_{ref}, \theta) = [P - P_0(z)] \cdot [P_{dyn}(z_{ref})]^{-1} \text{ Equação 5}$$

$$P_{dyn}(z_{ref}) = 0.5 \rho_{out} v^2(z_{ref})$$

Onde P pressão medida e P_0 = pressão atmosférica de referência

Portanto, os C_{ps} descrevem a pressão em pontos superficiais externos de um corpo pela ação de um fluido e são independentes do tamanho do modelo. Nas fachadas das edificações, esses coeficientes variam de ponto a ponto e em relação ao ângulo de incidência do vento. Além disso, apresentam alterações pela forma do corpo, obstruções próximas, e características do local (INMETRO, 2012).

Na Figura 13 pode-se observar como os valores dos C_{ps} nas superfícies de uma edificação variam em função da orientação do objeto com respeito à corrente livre do ar (SANTAMOURIS; ALLARD, 1998; YARKE, 2005).

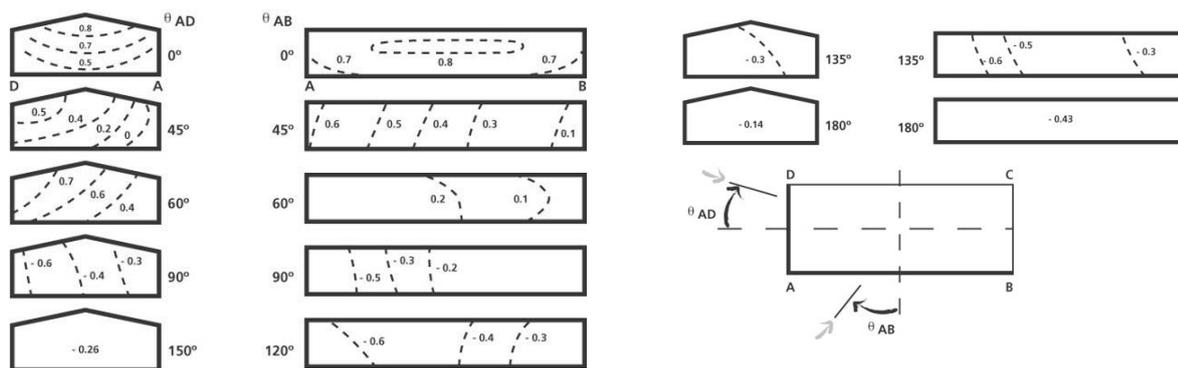


Figura 13 - Exemplo da distribuição do C_p no edifício. Fonte: Santamouris e Allard (1998).

2.2.5. Fontes para a obtenção do coeficiente de pressão

Em relação às fontes de obtenção do coeficiente de pressão (C_p), estas podem ser divididas em dois grupos: fontes primárias ou fontes secundárias. São consideradas fontes primárias aquelas nas quais os C_{ps} são obtidos a partir de testes em modelo real, testes de modelos reduzidos em túnel de vento ou pelo uso de simulações em programas computacionais de dinâmica de fluidos CFD (*Computational Fluid Dynamics*). São fontes secundárias aquelas que obtêm os C_{ps} por meio de métodos analíticos ou coletados através de bases de dados (CÓSTOLA et al., 2010; CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009; INMETRO, 2012)

2.2.5.1. Fontes primárias

a. Programas computacionais de dinâmica dos fluidos

Estes programas conhecidos por suas siglas em inglês como CFD (*Computational Fluid Dynamics*) são programas computacionais capazes de prever o fluxo do vento em uma edificação a partir de uma série de códigos de cálculos complexos. Estes programas são desenvolvidos por meio da aplicação da equação de Navier-Stokes sobre as características dinâmicas do ar como leis de conservação de massa, momento, energia e cálculos de transferência de calor (SANTAMOURIS; ALLARD, 1998). Ele pode criar uma rede bidimensional ou tridimensional de pontos em uma zona aos quais são atribuídos valores de pressão, temperatura e velocidade correspondentes (CÂNDIDO; BITTENCOURT, 2008; SANTAMOURIS; ALLARD, 1998). Outras de suas características consistem na possibilidade de gerar cálculos de troca de energia com seu entorno e prever alguns dos movimentos turbulentos do ar. Esses programas são também uma ferramenta confiável para o estudo qualitativo do vento, já que características como velocidade e direção podem ser facilmente visualizados a partir de produtos gráficos (CÂNDIDO; BITTENCOURT, 2008).

b. Túnel de vento de Camada Limite Atmosférica (CLA)

Por ser uma ferramenta metodológica relevante a este estudo, esta será apresentada como um capítulo único dentro deste documento (ver item 2.3.).

2.2.5.2. Fontes secundárias

a. Bases de dados

Os Cps obtidos por meio de bases de dados são uma das fontes secundárias mais consultadas. Estes bancos de dados reúnem informações de uma ou mais fontes primárias usadas principalmente para a análise de cargas promovidas pela força dos ventos nas edificações ou para estudos mais aprofundados do comportamento da infiltração e ventilação natural. As informações destas fontes são apresentadas segundo a geometria, orientação e direção dos ventos. O uso

destas bases de dados limita-se à um conjunto restrito de configurações geométricas geralmente isoladas (CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009).

A Escola Politécnica da Universidade de Tóquio fornece uma base de dados aerodinâmicos com Cps para edificações de baixa altura desenvolvidas em contextos suburbanos (TOKYO POLYTECHNIC UNIVERSITY, 2007). Além de permitir o acesso livre aos valores de Cp obtidos por meio de ensaios no túnel do vento para geometrias apenas retangulares, este banco de dados fornece aos usuários os Cps locais ou valores médios por superfície (QUAN et al., 2007).

Um programa que utiliza a base de dados da Escola Politécnica da Universidade de Tóquio, é o CataVento² (RORIZ; RORIZ, 2015a). Tal programa fornece os valores de Cp para qualquer ponto nas fachadas de edificações de geometrias retangulares. Neste programa é possível definir parâmetros como: (a) tipo de edificação (baixa ou alta); (b) proporções geométricas da edificação (lado maior/lado menor e altura/lado menor); (c) cidade; (d) tipo de rugosidade do terreno (campo aberto, subúrbio, cidade e metrópole); (e) azimute das fachadas; (f) quantidade de aberturas por fachada; e (g) posicionamento das aberturas na fachada.

b. Método analítico

Este método consiste na implementação de uma série de equações para o cálculo de Cps externos para configurações de geometrias específicas. O método analítico foi desenvolvido a partir de técnicas de regressão com dados coletados por meio de ensaios com modelos em escala real e reduzidos. Para as regressões foram considerados dados de diferentes configurações de edifícios, perfis de vento e rugosidades de terreno. A partir desta análise foram determinados os parâmetros que impactam os valores de Cp, a saber: geometria (altura, largura e comprimento), posição da fachada em relação ao vento, localização da edificação, tamanho do entorno, rugosidade e direção dos ventos. No que se refere às suas limitações, este método tem restrições para o cálculo de Cp em geometrias complexas (CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009). Entre alguns dos métodos analíticos, recomendados pelo Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética Edificações Residenciais – RTQ-R, pode-se

² Programa de uso livre disponível em: <https://www.dropbox.com/s/2vwia2j825h0tys/Catavento.rar?dl=0>.

mencionar: o modelo de Swami e Chandra (1988), CP generator, CPCALC+, Pressure Database1 (INMETRO, 2012).

CPCALC+ é um programa computacional que calcula os C_p nas envoltórias das edificações para o estudo da ventilação natural. Foi desenvolvido por um grupo de pesquisadores Europeus PASCOOL (Passive Cooling of Building) da comissão de comunidades europeias, com base na análise estatística dos dados obtidos em ensaios em túnel de vento (GROSSO, 1995). O programa calcula os C_p s a partir de uma geometria padrão. Pode-se variar dados como tipo de cobertura, variáveis relacionadas como o meio ambiente, meteorologia, geometria e posicionamento. No entanto, as combinações compreendidas por este banco de dados de C_p s se limitam às geometrias retangulares e aos parâmetros previstos nesse programa (GROSSO, 1995).

O modelo Swami e Chandra (1988), foi desenvolvido com o objetivo de facilitar os estudos sobre a ventilação natural. Este modelo calcula os C_p s externos para duas tipologias de edificações: baixas e altas. Para as edificações baixas é calculado um C_p médio por fachada. Para o caso das edificações altas, é incluída nos cálculos a altura do ponto de interesse na envoltória. O modelo Swami e Chandra (1988) é importante já que foi incorporado para o cálculo de C_p médios dentro dos modelos de rede (ver seção 2.2.6) (CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009; EERE, 2012).

2.2.6. Método de predição da ventilação natural: modelos de rede

Este método de predição é denominado “modelo de rede”; para calcular o fluxo de ar pela edificação, através das aberturas dispostas na envoltória externa (janelas, portas, e frestas) como é ilustrado pelas Figuras 14 e 15. Para o cálculo é necessário que se definam previamente as zonas térmicas da edificação. Cada zona térmica é caracterizada por um nó de pressão, o qual é interligado aos das demais zonas e aos nós de pressão externos. A interligação entre os nós de pressão é possível porque o valor de pressão do nó externo é conhecido o que permite calcular o valor dos nós das zonas internas aplicando para cada um deles a equação de balanço de massa (EERE, 2012; SANTAMOURIS; ALLARD, 1998; SORGATO, 2009). Este modelo de rede é empregado em programas de simulação de energia (*Building Energy Simulation - BES*) como um método simplificado de cálculo (CÓSTOLA; BLOCKEN; HENSEN, 2009).

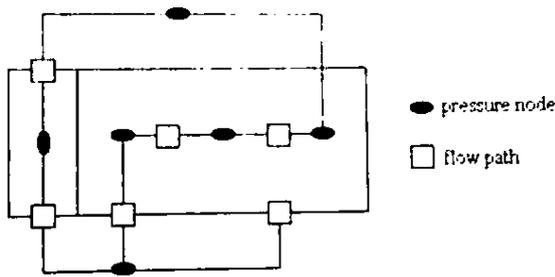


Figura 14 - Representação do modelo de rede em um edifício multi-zona. Fonte: Santamouris; Allard (1998).

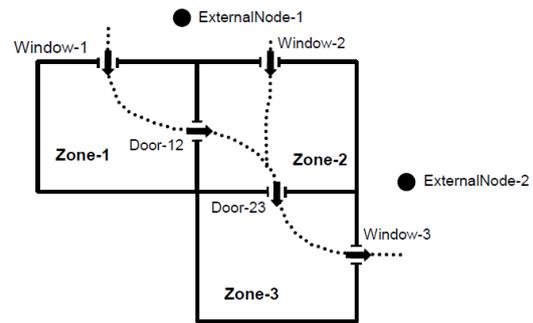


Figura 15 - Modelo de rede e possível percurso do fluxo do ar entre zonas. Fonte: EERE (2012).

2.3. Ensaios em túnel de vento

Para Givoni, (1969), existem dois métodos para realizar medições sobre a ação dos ventos nas edificações, os quais podem ser realizados mediante modelos em escala real ou reduzidos. O primeiro pressupõe grandes desafios por depender das condições existentes no entorno, como, disponibilidade, velocidade, ângulo de incidência dos ventos, rugosidade, e peculiaridades do local. Enquanto que os estudos com modelos reduzidos foram amplamente estudados por diferentes autores, avaliando o seu uso, demonstrando que o padrão do fluxo do ar para estudos sobre edificações são independentes do Número de Reynolds³ em certas faixas de velocidades do ar consideradas de normalidade, sem alterar a distribuição das pressões nas faces do modelo. Nessas condições é possível obter informação técnica a partir de modelos reduzidos (AYAD, 1999; BARLOW; RAE; POPE, 1999; CERMAK et al., 1984; GIVONI, 1976; SMITH, 1951).

Assim, os ensaios em túnel de vento constituem um dos métodos indicados para o estudo dos fenômenos físicos do vento. Sua função é recriar as condições do fluxo do vento da atmosfera real em um ambiente controlado artificialmente, reagindo ao contato com obstáculos imersos neste fluido. As obstruções neste tipo de ensaio são representadas pelo uso de modelos reduzidos, também conhecidos como maquetes (ASCE, 1999; KOWALTOWSKI et al., 2011; TOLEDO, 1999). Assim, esse

³ Segundo Loredo-Souza, Camaño e Paluch (2004), para as simulações da CLA em túneis de vento, o Número de Reynolds é tão grande que é de esperar que seja categorizado como um fluxo turbulento.

sistema, possui como finalidade obter informação técnica da ação dos ventos que representem o comportamento esperado em escala real (ASCE, 1999).

Existem diferentes tipos de túnel de vento, no entanto, nem todos eles permitem recriar com sucesso as características dos ventos na Camada Limite Atmosférica (CLA), requeridas pelos estudos de ventilação natural nas edificações (LOREDO-SOUZA; CAMAÑO; PALUCH, 2004). Os túneis de vento, chamados de CLA, foram desenvolvidos com o objetivo explícito de simular a região turbulenta da atmosfera a baixas altitudes (CÓSTOLA, 2006; LOREDO-SOUZA; CAMAÑO; PALUCH, 2004). Esses se caracterizam por serem mais longos quando comparados com os túneis aeronáuticos, e por estes requererem o uso de elementos geradores de turbulência para atingir o crescimento natural da CLA (LOREDO-SOUZA; CAMAÑO; PALUCH, 2004).

São necessários ensaios em túnel de CLA para estudos de ventilação natural quando por outros métodos simplificados (mesa *d'água*, bases de dados ou programas de simulação computacional de dinâmica dos fluidos), não é possível obter dados relevantes ou o detalhamento requerido (KOWALTOWSKI et al., 2011). Além disso, segundo Núñez, Loredou-Souza e Rocha (2009), se recomenda o uso destes ensaios quando não existe informação disponível na norma sobre cargas exercidas pelo vento nas edificações ou em projetos com geometrias complexas onde é necessário conhecer o efeito da ação dos ventos nas mesmas.

De acordo com diferentes autores ASCE (1999), Barlow, Rae e Pope (1999), Kowaltowski et al., (2011), Loredou-Souza, Camaño e Paluch (2004) Núñez, Loredou-Souza e Rocha (2009), Toledo (1999) os ensaios em tuneis de vento de CLA para ambientes construídos podem ser classificados de acordo com vários critérios, como: (a) Tipo de sistema (túnel de retorno fechado, túnel de retorno aberto); (b) área de estudo (estruturais, aerodinâmica das edificações, topográficos, poluição, ou de conforto); (c) escala de estudo (urbana ou do edifício); e (d) conforme o tipo de ensaio (qualitativo ou quantitativo).

a. Tipo de sistema

Segundo Loredou-Souza, Camaño e Paluch (2004), os sistemas para os tuneis de CLA podem apresentar duas configurações típicas, assim: (1) túnel de retorno fechado, onde o fluxo do ar é forçado a recircular e (2) túnel de retorno aberto, onde o ar é sugado por um extremo e expulso pelo outro. As duas configurações

são ilustradas nas Figuras 16 e 17 respectivamente. Para os mesmos autores, ambos os casos têm vantagens e desvantagens, que deveriam ser considerados. Por exemplo, um dos benefícios do sistema fechado é a economia de energia no seu funcionamento, embora seja um sistema mais custoso de construir quando comparado com o sistema aberto, além do aquecimento do ar, resultado do processo de recirculação. No sistema aberto o ar conserva uma mesma temperatura no escoamento do ar por este ser renovado constantemente, porém requer o controle da pressão atmosférica da área de trabalho por meio de vedações em torno das portas e mesas de trabalho para evitar o vazamento do ar.

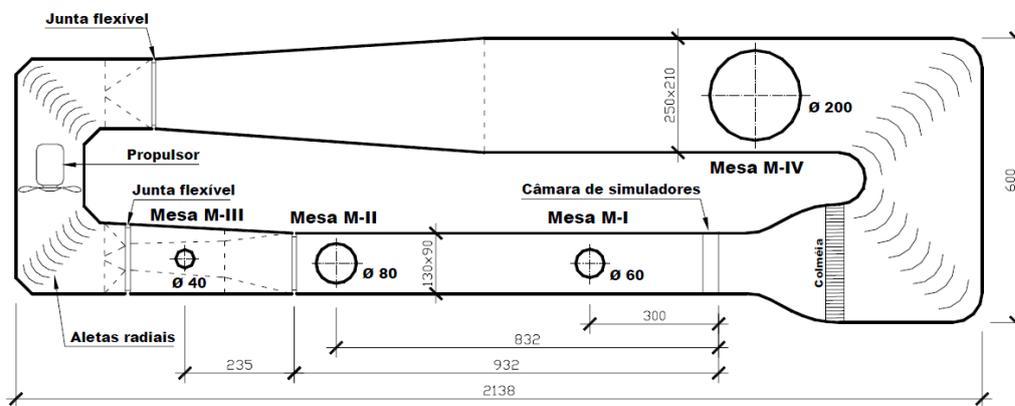


Figura 16 - Túnel de retorno fechado da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil. Fonte: Blessmann (1982).

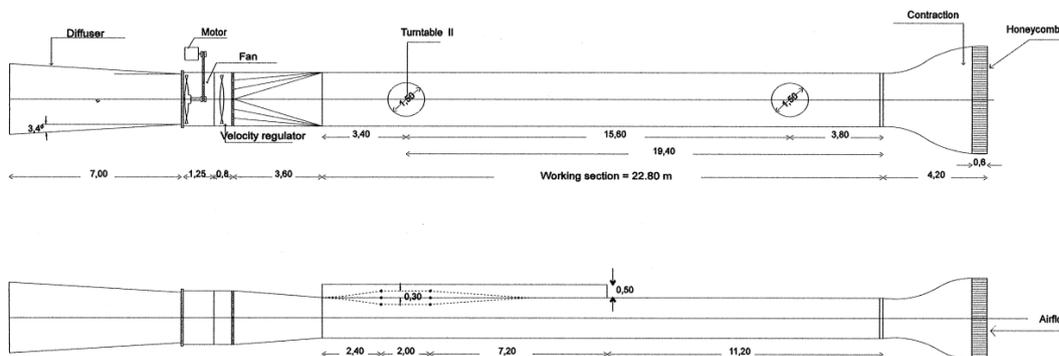


Figura 17 - Túnel de retorno aberto da Universidad Nacional del Nordeste, Resistencia, Argentina. Fonte: Wittwer e Möller (2000)

b. Escala de estudo

A escala do estudo pode ser classificada entre urbana ou do edifício, definida segundo a finalidade do análise. Os ensaios na escala urbana são realizados em peças de território maiores para conhecer os efeitos aerodinâmicos

do vento nesta porção de área, interagindo com o traçado urbano (KOWALTOWSKI et al., 2011). Na escala do edifício sua aplicabilidade apresenta variados enfoques de análise, entre os quais estão proporcionar informação a problemas estruturais ou de conforto nas edificações.

c. Área de estudo

Em conformidade com o item anterior e de acordo com Toledo (1999), os estudos urbanos são comumente utilizados para realizar a análise das problemáticas em áreas de estudo tais como: geomorfologia, arranjos, tipologias e densidades urbanas. Com a finalidade de proporcionar informação de interesse no planejamento das cidades, e no conforto térmico de seus habitantes. (ASCE, 1999; TOLEDO, 1999).

Na escala do edifício os ensaios em túneis de vento de CLA são focados especialmente em estudos sobre cargas geradas pelo efeito do vento nas estruturas, principalmente em projetos sensíveis à resposta aerodinâmica, como torres, pontes, ou nos casos que o objeto de estudo tenha características particularmente especiais que necessitam ser testadas em etapas iniciais do projeto (ASCE, 1999; TOLEDO, 1999). Conforme ASCE (1999), outra área de aplicação destes ensaios é o estudo do conforto térmico, qualidade do ar e dispersão de poluentes, sendo seu principal objetivo fornecer soluções aos problemas de ventilação nas edificações (TOLEDO, 1999).

d. Tipo de análise

Os ensaios no túnel de vento podem ser divididos entre qualitativos ou quantitativos (KOWALTOWSKI et al., 2011; TOLEDO, 1999). Em um teste quantitativo são aferidos parâmetros de grandezas importantes para a análise da ventilação natural em condições semelhantes às que acontecem no ambiente atmosférico, como a velocidade do vento interno e externo, coeficientes de descarga e coeficientes de pressão. Estes dados em estudos de conforto contribuem com o melhor posicionamento, tipo e tamanho das aberturas nas edificações e velocidades do ar atingidas no interior. Por exemplo, os pontos das superfícies com maiores valores de C_p são indicados para abertura de entrada de ar e os valores menores são adequados para as aberturas de saída (KOWALTOWSKI et al., 2011).

Já o estudo qualitativo está destinado a vislumbrar, tanto a trajetória, quanto o comportamento do fluxo do ar em interação com o modelo reduzido. A Figura 18 exemplifica o tipo de visualização gerado pela técnica da fumaça. Este tipo de teste é utilizado em construções para definição de geometria, orientação, e informação complementar para determinar o melhor posicionamento das aberturas na envoltória, ou os efeitos na trajetória do vento pela presença de elementos arquitetônicos, ou do entorno (KOWALTOWSKI et al., 2011; TOLEDO, 1999). As duas técnicas de visualização mais usadas são por meio de fumaça ou com erosão com areia (PRATA-SHIMOMURA; CELANI; FROTA, 2011).

A técnica de visualização por meio de fumaça tem como princípio injetar as correntes de vento, uma fumaça de cor branca perto da área do modelo para permitir observar a trajetória do fluxo de ar (KOWALTOWSKI et al., 2011). Segundo Toledo (1999) é indicado para ensaios qualitativos o uso de modelos na maior escala possível de acordo como o túnel empregado, para promover uma melhor observação das linhas de fluxo de ar no interior de tais modelos. É recomendável usar velocidades baixas para evitar a rápida dissipação da fumaça e assim conservar seu movimento laminar (KOWALTOWSKI et al., 2011).

A técnica de erosão de areia consiste na disposição de uma pequena camada de material particulado na área de ensaio do modelo reduzido. Tal material é deslocado no momento em que é induzida a ventilação promovendo marcas de erosão que ilustram a ação do vento interagindo com o modelo (PRATA-SHIMOMURA; CELANI; FROTA, 2011). Na Figura 19 observa-se o emprego da técnica de erosão por meio de areia em testes qualitativos em túneis de vento.

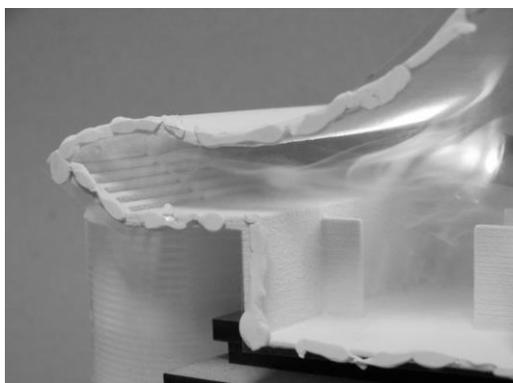


Figura 18 - Ensaio qualitativo por meio de fumaça. Fonte: Oliva e Celani (2008)

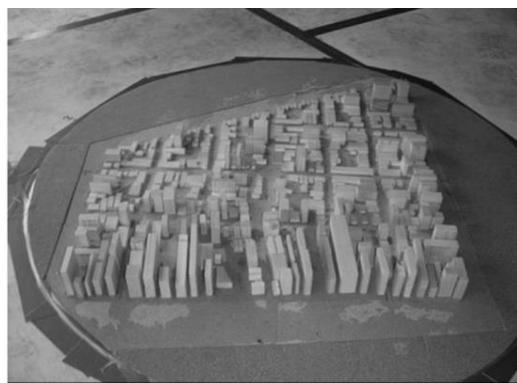


Figura 19 - Ensaio qualitativo por meio de erosão com areia. Fonte: Prata (2005).

2.3.1. Camada Limite Atmosférica (CLA) em túnel de vento

A CLA no túnel de vento tem como fim representar o ambiente atmosférico na faixa compreendida entre a rugosidade superficial até o ponto de atingir a velocidade da corrente livre, de forma semelhante às características reais do vento em uma região. A CLA deve ser ajustada de acordo com a escala do modelo, que por sua vez é definida pelo tipo de estudo a ser realizado (BARLOW; RAE; POPE, 1999; KOWALTOWSKI et al., 2011). Para Loredou-Souza, Camaño e Paluch (2004) os métodos de simulação da CLA podem se classificar entre ativo, passivo ou uma combinação de ambos.

2.3.1.1. Método ativo para simulação da CLA

O método ativo simula a CLA mediante uma técnica aerodinâmica que consiste na injeção de jatos de ar transversais ao fluxo de vento principal (BLESSMANN, 1982; LOREDO-SOUZA; CAMAÑO; PALUCH, 2004). As vantagens de acordo com os autores correspondem ao aumento da velocidade média no escoamento do ar, graças ao ar injetado de forma perpendicular à corrente principal, o que é contrário da perda de velocidade média pelos métodos passivos. Outras das vantagens mencionadas se referem ao fato de controlar os jatos mudando as características da corrente do vento principal sem interrupção durante o processo do ensaio. Na Figura 20 se apresenta os dispositivos de emissão de jato usado no método ativo.

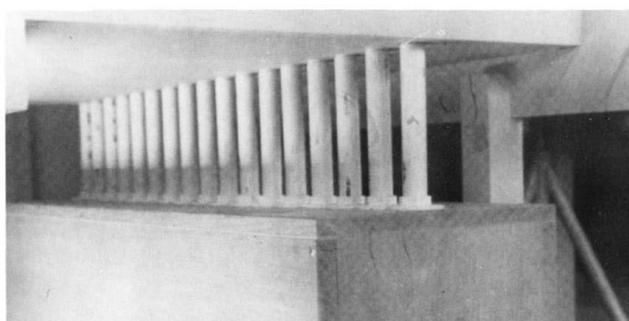


Figura 20 - Dispositivo emissor de jatos do túnel de vento pelo método ativo. Fonte: Blessmann (1982).

2.3.1.2. Método passivo para simulação da CLA

Neste método o fenômeno é simulado mediante o uso de elementos de rugosidade artificial. Um arranjo típico é feito com dispositivos de rugosidades,

barreiras, e dispositivos de mistura, conforme exemplificados na Figura 21. Os dispositivos de rugosidade e a barreira são dispostos no piso do túnel com o objetivo de forçar o crescimento natural da CLA como é ilustrado nas Figuras 22 e 23. Os tamanhos e a extensão do campo dos geradores de turbulência respondem ao fator de escala escolhido e a espessura da CLA desejada para o ambiente simulado. Assim, para um ambiente urbano é necessário uma maior rugosidade que a requerida para uma zona de "campo aberto" (LOREDO-SOUZA; CAMAÑO; PALUCH, 2004).

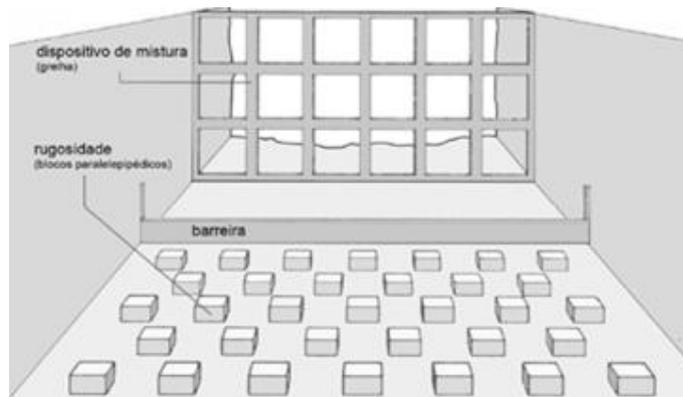


Figura 21 - Arranjo típico dos dispositivos de simulação em túnel de vento. Fonte: Loredo-Souza, Camaño e Paluch (2004).

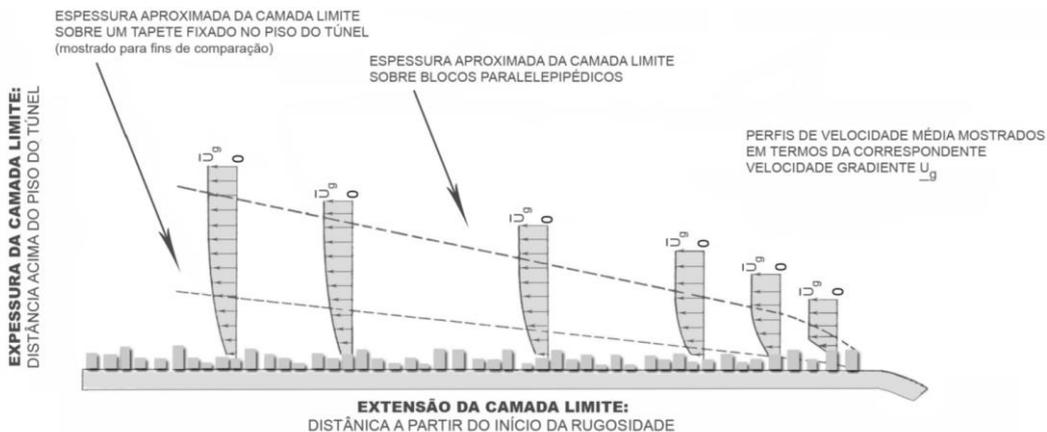


Figura 22 - Crescimento natural da CLA em túnel de vento. Fonte: Loredo-Souza, Camaño e Paluch (2004).

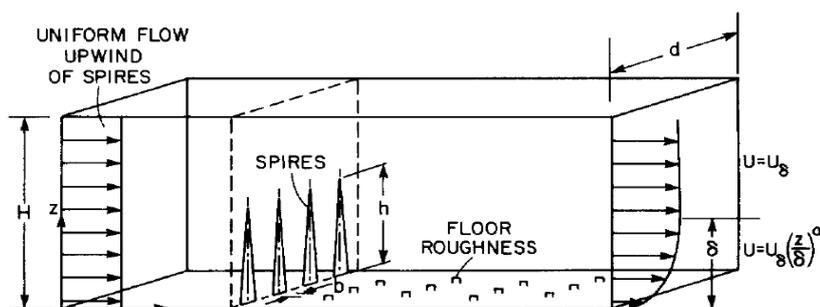


Figura 23 - Esquema da disposição dos elementos de rugosidade para simulação da CLA. Fonte: Irwin (1981).

As barreiras compensam o *déficit* na quantidade de movimento à altura do piso, entretanto estes e os dispositivos de mistura podem variar em forma e tamanho de acordo com características do escoamento desejado (LOREDO-SOUZA; CAMAÑO; PALUCH, 2004). Por exemplo, o dispositivo de mistura em forma de grelha apresentado na Figura 21 é utilizado para gerar uma turbulência homogênea, e é empregado em simulações da região superficial da terra. Enquanto os simuladores tipo elípticos de Counihan (1969) (*spires*), são usados para representar a altura total de turbulências variando à medida de sua aproximação ao solo. Estes por sua vez podem apresentar diferentes combinações (com perfurações, placas triangulares, dente de serra, degraus na parte superior da placa, trapezoidais) (LOREDO-SOUZA; CAMAÑO; PALUCH, 2004), como são ilustrados nas Figuras 24 e 25.

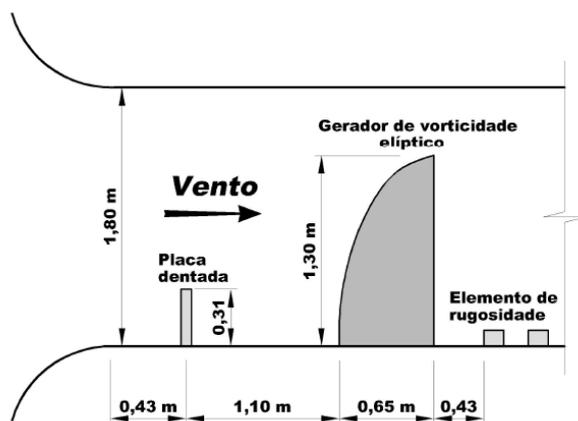


Figura 24 - Dispositivos de simulação tipo Counihan modificado. Fonte: Loredo-Souza, Camaño e Paluch (2004).

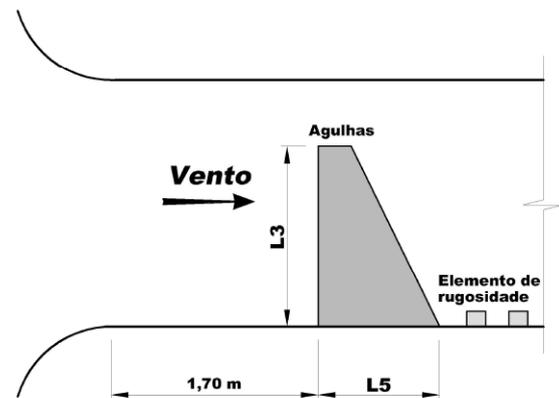


Figura 25 - Dispositivos de simulação tipo Standen modificado. Fonte: Loredo-Souza, Camaño e Paluch (2004).

2.3.1. Velocidade do vento na CLA

As faixas das velocidades do vento usadas no túnel de vento de CLA são calculadas baseadas na escala do modelo, constituindo maiores velocidades tanto quanto menor for o modelo reduzido (CÓSTOLA, 2006). A equação para denominar a faixa de velocidade é expressa por (KOWALTOWSKI et al., 2011; TOLEDO, 1999):

A área de obstrução do modelo é dada pela Equação 6:

$$A_m = 0,05 \cdot A_t \text{ Equação 6}$$

Onde A_t é a área em m^2 da seção do túnel de vento. O raio aerodinâmico (r_a) é

representado pelo dobro da área de obstrução do modelo (A_m) dividido pela soma da face lateral tangenciada pelo ar mais duas vezes a altura do modelo ($P = \text{altura} + \text{profundidade} + \text{altura}$) apresentada na Equação 7.

$$r_a = \frac{2A_m}{P} \text{ Equação 7}$$

Assim, as faixas das velocidades no túnel de vento são dadas pela Equação 8:

$$\frac{0,25}{r_a} \leq V \leq \frac{12,5}{r_a} \text{ Equação 8}$$

Onde V é a velocidade do vento em m/s.

2.3.2. Equipamentos

Entre alguns dos instrumentos utilizados nos ensaios em túnel de vento de CLA para medir as grandezas do vento como velocidade e pressões estão: o tubo de *Pitot*, anemômetros, micromanômetros e escâner de pressão (ASCE, 1999; BLESSMANN, 1982; HOLMES, 2015; IRWIN, 1981).

2.3.2.1. Tubo *Pitot*

Por meio do tubo *Pitot* (ver Figura 26) é possível medir a pressão total e a pressão estática do ar diretamente, enquanto a pressão dinâmica (energia cinética), é resultado da diferença entre estas duas pressões. A pressão total é gerada pela interrupção brusca do ar que entra pelo furo central até o ponto de repouso ou estagnação. A pressão estática é captada pelos furos dispostos nas laterais do tubo, sempre que o tubo está alinhado na direção do escoamento (AZZI PITTA, 2001; BARLOW; RAE; POPE, 1999; SCHNEIDER, 2011).

2.3.2.2. Anemômetro de fio quente (*Constant Temperature Anemometry* CTA)

A velocidade no interior do modelo pode ser obtida através do uso do anemômetro de fio quente à temperatura constante. A Figura 27 apresenta este aparelho (CTA). Este equipamento trabalha mediante o aquecimento do fio de

tungstênio através da passagem de corrente elétrica que é resfriada pelo efeito de convecção do vento, o circuito elétrico compensa a perda de calor gerado pela ventilação, o que resulta diretamente proporcional à velocidade do vento (ASCE, 1999).

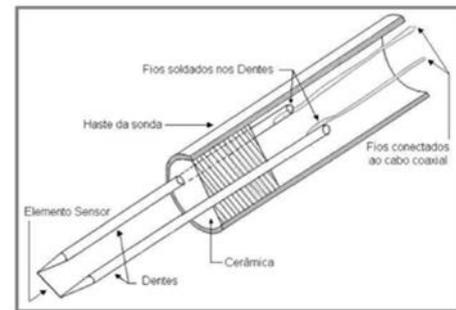
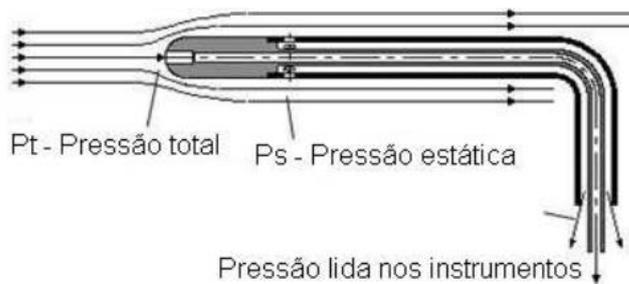


Figura 26 - Ilustração do funcionamento do tubo de Pitot Prandtl. Fonte: <http://zone4info.com/articles/print/112/format/smoothbox> Acesso 26/07/2016.

Figura 27 - Anemômetro de fio quente CTA.

2.3.2.3. Outros instrumentos

Outro instrumento empregado em tuneis de vento são os geradores de fumaça requerida pelos testes qualitativos. Para a visualização das linhas do fluxo do ar podem ser utilizados gelo seco, óleo vegetal ou glicerina, bombeado por meio de ponteira tubular (ASCE, 1999; KOWALTOWSKI et al., 2011; LOREDO-SOUZA; CAMAÑO; PALUCH, 2004; NÚÑEZ; LOREDO-SOUZA; ROCHA, 2009). Um exemplo do uso de fumaça é apresentado na Figura 28.

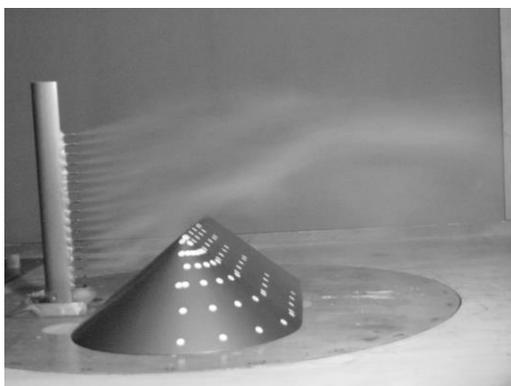


Figura 28 - Linhas do fluxo por meio de fumaça. Fonte: Loredo-Souza, Camaño e Paluch (2004)

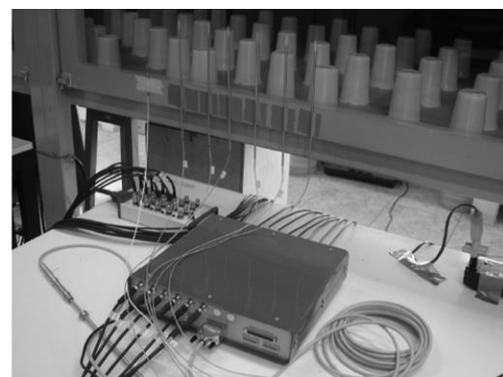


Figura 29 - Sensor de anemômetro de fio quente. Fonte: Lukiantchuki (2010).

O sensor de fio quente é um instrumento usado para converter as correntes elétricas em velocidade em diferentes direções, mediante um programa instalado em um computador, conforme apresentado na Figura 29. O escâner de pressão de vários canais é outro equipamento requerido em ensaios quantitativos em tuneis de vento. Este tem como função realizar aferições simultâneas de pressões em diferentes pontos da superfície do modelo, este aparelho é ilustrado na Figura 30.

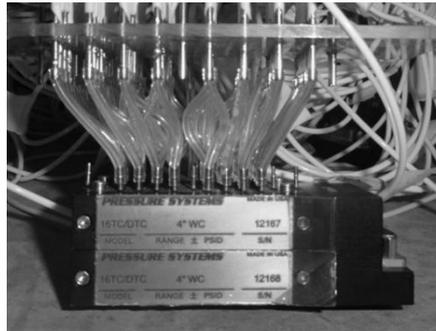


Figura 30 - Pressure scanner. Fonte: autor.

2.3.3. Modelos reduzidos

Os modelos reduzidos (maquetes) têm como objetivo a representação de um protótipo real com o detalhamento de características importantes para o estudo da ventilação nas edificações, tais como aberturas, geometria, obstruções vizinhas entre outras. Estas características precisam ser fielmente reproduzidas, já que qualquer destes aspectos pode mudar a trajetória do fluxo do vento (TOLEDO, 1999). As maquetes podem ser elaboradas de diferentes materiais (madeira, acrílico, ou gesso) e, se o interesse é fazer um estudo qualitativo, é recomendado o uso de materiais translúcidos (KOWALTOWSKI et al., 2011; PRATA-SHIMOMURA; CELANI; FROTA, 2011; TOLEDO, 1999).

Qualquer que seja o tipo de ensaio a ser realizado, é importante que o modelo suporte os esforços a que vai ser submetido pelo vento, além de permitir o manuseio no processo da instrumentação e preparatórios (KOWALTOWSKI et al., 2011).

2.3.4. Definição da escala do modelo

A definição da escala do modelo a ser simulado é um parâmetro importante para a validação dos resultados mediante ensaios em túneis de CLA. A escala é

definida de acordo com a seção de área do túnel de vento e o tamanho da área de estudo (de edifício, ou urbano) (BARLOW; RAE; POPE, 1999; PRATA-SHIMOMURA; CELANI; FROTA, 2011). Embora não existam critérios unificados entre distintos autores de qual porcentagem de obstrução se deva usar, muitos deles concordam que a porcentagem não deve ultrapassar 7% da área de obstrução no ponto onde o modelo reduzido possui a maior área exposta ao escoamento do vento com relação à seção transversal do túnel (KOWALTOWSKI et al., 2011; PRATA-SHIMOMURA; CELANI; FROTA, 2011). Contudo, o uso ideal corresponde a 5% de área de obstrução, conforme com o sugerido por Barlow, Rae e Pope, (1999) e Toledo (1999) para garantir que o modelo em nenhuma orientação ultrapasse o limite de 7%.

A Equação 9 pela qual é obtida as dimensões favoráveis para um túnel qualquer, pode ser expressa da seguinte forma (KOWALTOWSKI et al., 2011).

$$A_t = (\text{largura} \cdot \text{altura}) \text{ do tunel} \quad A_m = 0,05 \cdot A_t \quad \text{Equação 9}$$

Onde A_t corresponde à área transversal do túnel e A_m a área destinada a obstrução

$$A_p = (\text{largura} \cdot \text{altura}) \text{ do prototipo}$$

Assim a escala do protótipo estaria dada pela Equação 10.

$$\text{Escala} = \sqrt{\frac{A_p}{A_m}} \quad \text{Equação 10}$$

2.4. Radiação solar nas edificações

A radiação solar é definida como a propagação de ondas eletromagnéticas, as quais são divididas em três regiões do espectro: ultravioleta, visível e infravermelho. Da totalidade dessa energia que é emitida pelo sol, só uma parte atinge a superfície terrestre. A restante é bloqueada pela presença das nuvens, e ou absorvida por componentes atmosféricos como dióxido de carbono, vapor de água, ozônio, entre outros. A radiação de onda curta ou radiação direta, ao entrar

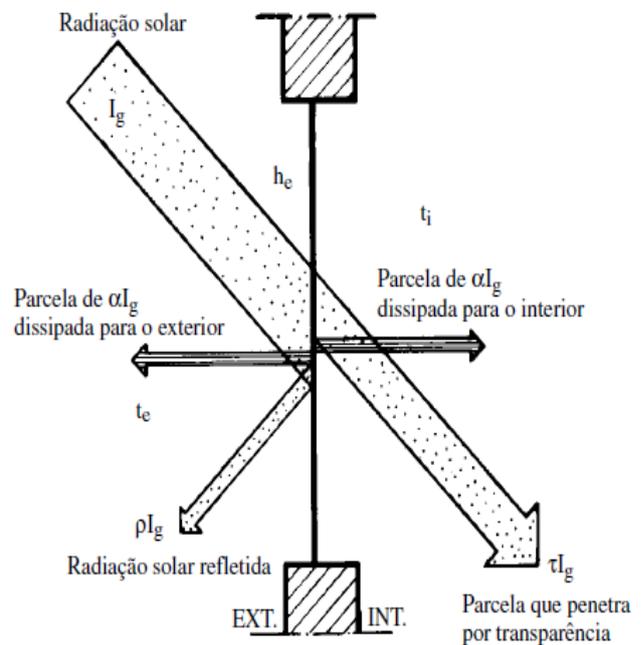


Figura 31 - Troca de calor através de superfícies translúcidas ou transparentes. Fonte: Frota e Schiffer (2001).

em contato com qualquer superfície, absorvida por ela e transformada em calor. Estas superfícies, por sua vez, emite radiação de onda longa, que junto com a radiação direta, aquece o ar e determinam a temperatura do local. A energia transmitida pela radiação direta depende da distância do trajeto dos raios solares que atravessam a atmosfera. Assim, a intensidade e duração da radiação solar varia de acordo com o eixo de rotação da Terra e o período do dia (GIVONI, 1976; OLGAY, 1998). Segundo Olgyay (1998), as trocas de calor por radiação nas edificações são decorrentes de: (1) radiação direta de onda curta, (2) radiação difusa de onda curta transmitida pelo céu, (3) radiação de onda curta refletida pelos terrenos próximos, (4) radiação de onda longa das superfícies aquecidas, (5) radiação de onda longa emitida pelos edifícios ao céu.

É sabido que a radiação solar interage com as edificações através de suas superfícies opacas e translúcidas. Para as superfícies opacas, do total de energia recebida, parte é absorvida pelo material e parte refletida de volta ao meio externo. Já para as superfícies translúcidas, parte da energia é absorvida, parte refletida e outra importante parcela é transmitida ao interior (GIVONI, 1976). A Figura 31 ilustra as trocas de calor entre as parcelas absorvida, refletida e transmitida por uma superfície translúcida ou transparente.

2.4.1. Dispositivos de sombreamento

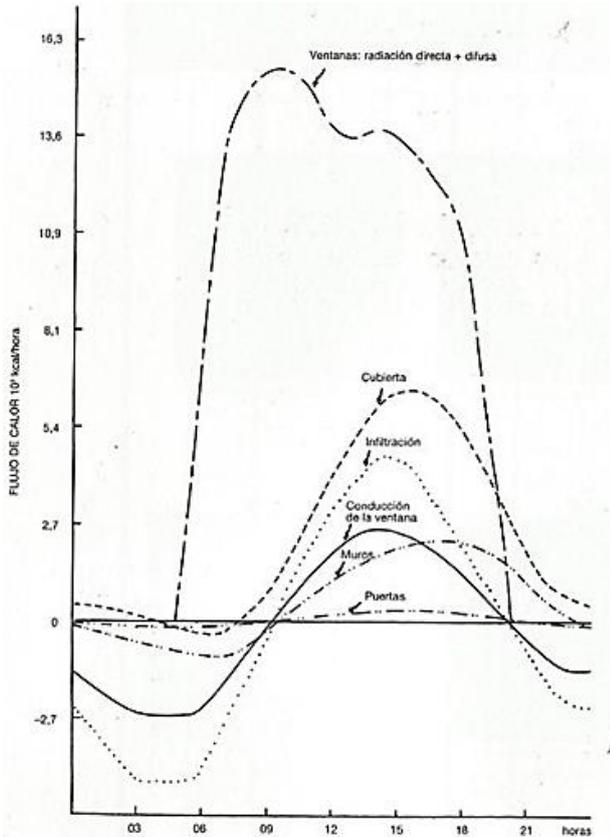


Figura 32 - Fluxo de calor através de diferentes elementos da envoltória. Fonte: Olgyay (1998).

De acordo com Olgyay (1998), as envoltórias dos edifícios estão compostas pela soma de elementos que constituem barreiras físicas com o objetivo primário de proteger as pessoas das condições do ambiente externo. As fachadas controlam tanto a entrada do vento, luz, sons e odores, quanto os ganhos ou perdas de calor nas edificações. Para o autor, as fachadas têm uma grande responsabilidade no conforto ou desconforto dos usuários no interior das edificações.

O uso de superfícies envidraçadas cada vez maiores apresenta, grandes desafios para fornecer ambientes confortáveis aos usuários. Olgyay (1998) comparou os

fluxos de calor através de diferentes elementos da fachada. Na Figura 32 é ilustrado o fluxo de calor por diferentes elementos da fachada de um projeto habitacional em Nova Iorque (OLGYAY, 1998). A partir deste estudo é possível constatar que uma superfície envidraçada pode transmitir muito mais calor quando comparada a uma superfície opaca, esclarecendo que esta relação não é fixa, variando em função de diversas condições como: orientação, localização, período do dia e propriedades térmicas dos materiais etc. Isso enfatiza, de forma geral, a vulnerabilidade destas superfícies aos efeitos solares. Entretanto, quando essas superfícies envidraçadas foram sombreadas, foi possível reduzir um terço do impacto da radiação.

Outro estudo apresentado por Olgyay (1998), comparou a transmissão de calor (kcal) para 1m² de área envidraçada, composta por quatro superfícies com e sem sombreamento para diferentes orientações, na cidade de Nova Iorque, para um dia representativo de verão (21 de julho). A Tabela 1 apresenta uma síntese

dos resultados expostos por Olgyay (1998) neste estudo. Os resultados demonstraram uma média geral de redução de carga térmica de uma quinta parte entre todas as orientações, embora os valores por fachada em cada caso variaram em relação à sua orientação, especialmente para orientações Leste e Oeste.

Tabela 1 - Resumo da energia transmitida por superfícies envidraçadas com e sem sombreamento para diferentes orientações. Fonte: Olgyay (1998).

	Sem sombreamento (kcal)	Com sombreamento (kcal)	%
Leste	2962	362	88
Sul	1630	373	77
Oeste	2962	362	87
Norte	823	332	60

Para vários autores, os dispositivos de proteção solar tornaram-se elementos de uso recorrentes na arquitetura por sua eficácia no controle dos ganhos de calor, decorrente do bloqueio da radiação direta do sol. O objetivo fundamental dos dispositivos de sombreamento como estratégia bioclimática é contribuir no conforto dos usuários e na eficiência energética das edificações (FROTA; SCHIFFER, 2001; GIVONI, 1976; OLGAY, 1998). Para Givoni (1976), o desempenho térmico desta estratégia está condicionado a variáveis tais como posição do sol no dia, orientação, e latitude.

Os dispositivos de sombreamento podem ser classificados de acordo com características próprias do projeto, tais como: (1) posicionamento em relação à área envidraçada (externos, internos e intermediários) (2) configuração (horizontais, verticais e combinados) e (3) operabilidade (fixos, ajustáveis ou retráteis). Enfatizando que dependendo do uso em cada situação seu desempenho térmico será diferente (GIVONI, 1976; OLGAY, 1998). Para Olgyay (1998), os dispositivos quando colocados no exterior apresentam melhor desempenho, uma vez que bloqueiam a passagem dos raios solares antes destes atingirem as superfícies transparentes ou translúcidas da edificação.

2.4.2. Representação gráfica dos dispositivos de sombreamento

Externos

Um dispositivo de sombreamento é eficaz quando for capaz de bloquear a radiação solar direta sobre uma superfície ou abertura no período que se estima conveniente (FROTA; SCHIFFER, 2001). Para isto é importante conhecer a posição do

sol no período do ano em que é desejado evitar a insolação direta. Para a projeção dos dispositivos de sombreamento é empregado o método de traçado de máscaras. Este consiste no dimensionamento de seus elementos, com ajuda da carta solar local e um transferidor auxiliar. A carta solar contém os trajetos do sol para uma dada latitude, o que permite determinar o período onde é necessária a geração de sombra para uma orientação previamente estabelecida. Já para conhecer os ângulos de projeções efetivos para cobrir os períodos anteriormente definidos é requerido o uso do transferidor auxiliar. Este permite realizar projeções estereográficas do plano do horizonte com relação ao ponto de um observador em uma superfície vertical para três ângulos α , β e γ (FROTA; SCHIFFER, 2001). As Figuras 33 e 34 apresentam os modelos típicos de uma carta solar e o transferidor auxiliar empregado por este método.

Latitude 24° Sul

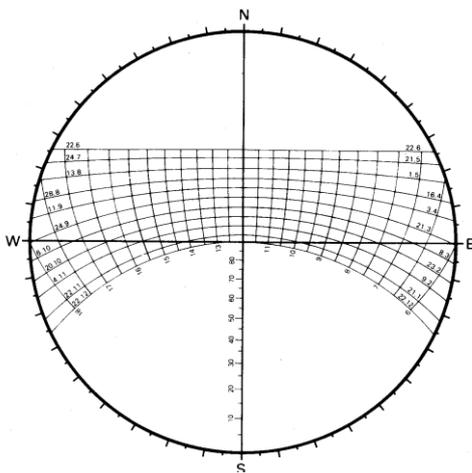


Figura 33 - Carta solar para a latitude 24° sul. Fonte: Frota e Schiffer (2001).

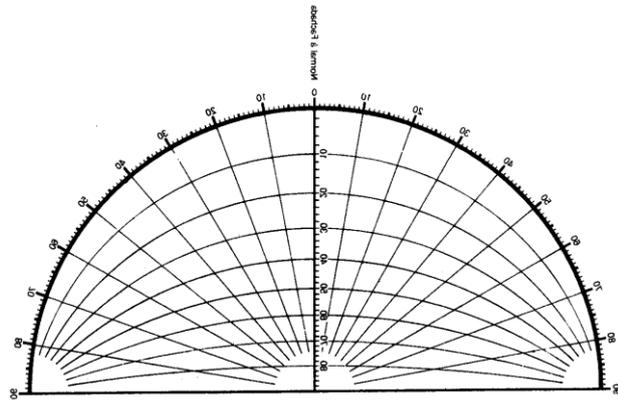


Figura 34 - Modelo de transferidor auxiliar. Fonte: Frota e Schiffer (2001).

Com a informação obtida a partir do uso destes dois elementos, é possível conhecer quais serão os ângulos α , β e γ efetivos para gerar o sombreamento desejado para uma abertura em determinada orientação. A Figura 35 apresenta dois exemplos de ângulos de sombra para duas configurações de dispositivos de proteção solares.

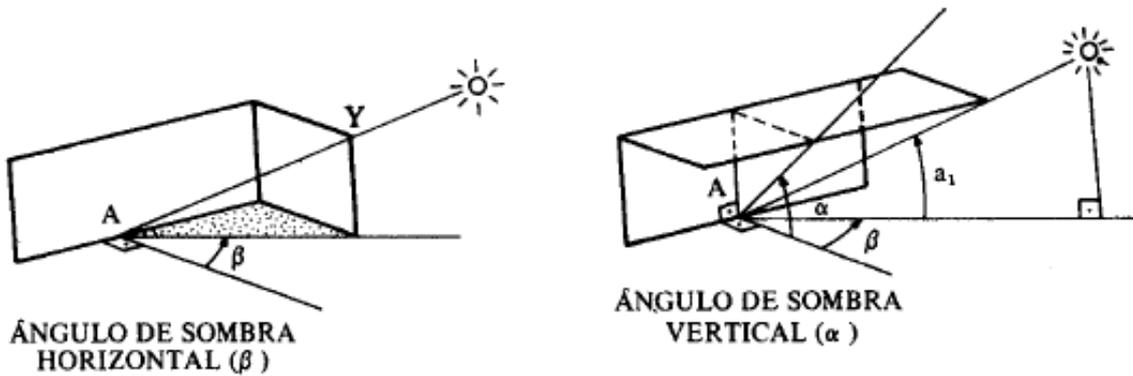


Figura 35 - Exemplos de ângulos de sombra gerados por dispositivos de proteção solar horizontais e verticais. Fonte: Frota e Schiffer (2001).

As soluções geradas a partir deste traçado de máscaras podem ser variadas, permitindo projetar dispositivos de sombreamento com configurações distintas para o mesmo período, sempre que sejam respeitados os ângulos obtidos inicialmente para esse caso. As Figuras 36 e 37, ilustram duas alternativas de traçado de máscaras para o mesmo período, com diferentes eficiências.

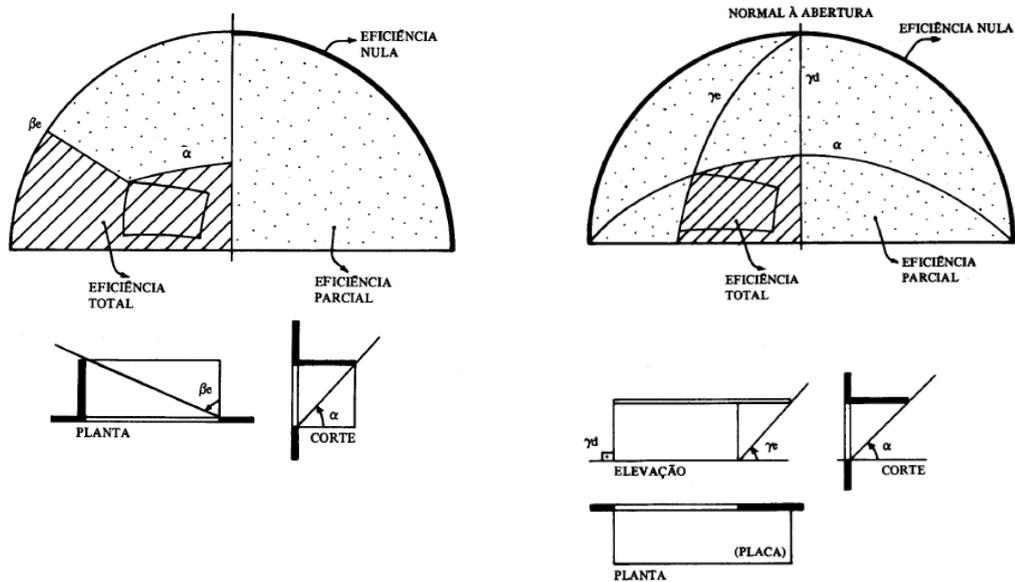


Figura 36 - Alternativa 1: placa horizontal sobre limite superior da abertura. Fonte: Frota e Schiffer (2001).

Figura 37 - Alternativa 2: combinação de placa horizontal e vertical. Fonte: Frota e Schiffer (2001).

Em relação à eficiência dos dispositivos de sombreamento, estes podem ser considerados com eficiência total quando a totalidade da abertura estiver à sombra. Nos casos em que apenas uma parte da abertura estiver coberta, sua eficiência será parcial, e, por fim, nas áreas em que não há sombreamento, sua eficiência é considerada nula.

2.5. Estudos de referência

Neste capítulo são apresentados de forma sucinta, os estudos que foram relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa.

2.5.1. Estudos sobre dispositivos de sombreamento e similares e sua influência na ventilação natural

- Kirimtat et al. (2016)

Objetivo: apresentar uma revisão de literatura compilando diferentes trabalhos que fornecem informações sobre dispositivos de sombreamento e sua modelagem em programas de simulação. Um dos trabalhos referenciados por estes autores é o realizado por Hien; Istiadji, (2003) apresentado na sequência.

- Hien e Istiadji (2003)

Objetivo: avaliar os efeitos dos dispositivos de sombreamento externos na iluminação e ventilação natural em uma edificação residencial em Cingapura.

Metodologia: O objeto de estudo foi uma edificação habitacional multipavimentos do programa de habitação social em Cingapura (*Housing evelopment Board -HDB*). O estudo foi dividido em duas etapas, sendo a primeira de validação e verificação por meio de medições no local de características como: velocidade do vento, temperatura e iluminação, para posteriormente serem comparados com dados simulados. Na segunda etapa foram analisados sete tipos de dispositivos de sombreamento conforme a Figura 38 para dois dias. Foi utilizado para as simulações de ventilação natural o programa PHOENICS (Programa de simulação computacional de dinâmica dos fluidos, CFD) (CHAM LIMITED, 2015) e LIGHTSCAPE para a análise de iluminação natural.

Principais conclusões: Para os autores em geral a adoção de dispositivos de sombreamento acarretou reduções na velocidade do ar no interior da edificação, mesmo que a redução não tenha sido significativa. A faixa de variação registrada foi de 1,5% para o dispositivo tipo pérgola e de até 5% para os dispositivos compostos por superfícies horizontais e verticais. Em relação à temperatura interna

houve uma faixa de redução para todos os dispositivos entre 0,5°C até 1°C. Especificamente os dispositivos horizontais diminuíram a temperatura interna entre 0,61 até 0,88°C. Para os autores os dispositivos de sombreamento que combinam superfícies verticais (em ambos os extremos) foram os menos efetivos no controle da luz solar e na ventilação natural.

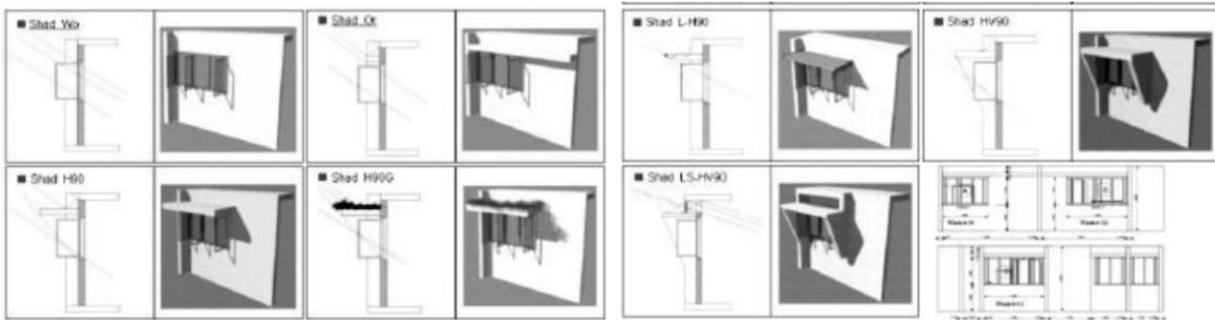


Figura 38 - Configurações de dispositivos de sombreamento estudados. Fonte: Hien e Istiadji (2003).

- Chand e Krishak (1971)

Objetivo: O propósito do trabalho foi analisar a influência do uso de dispositivos de sombreamento na velocidade e distribuição do vento no interior da edificação.

Metodologia: Foram realizados ensaios em túnel de vento de baixa velocidade (ou túnel de CLA) para um quarto com diferentes configurações de dispositivos de sombreamento. Os casos de estudo compõem seis configurações de dispositivos de sombreamento (horizontais, verticais e combinados) para diferentes ângulos de incidência do vento (ver Figura 39).

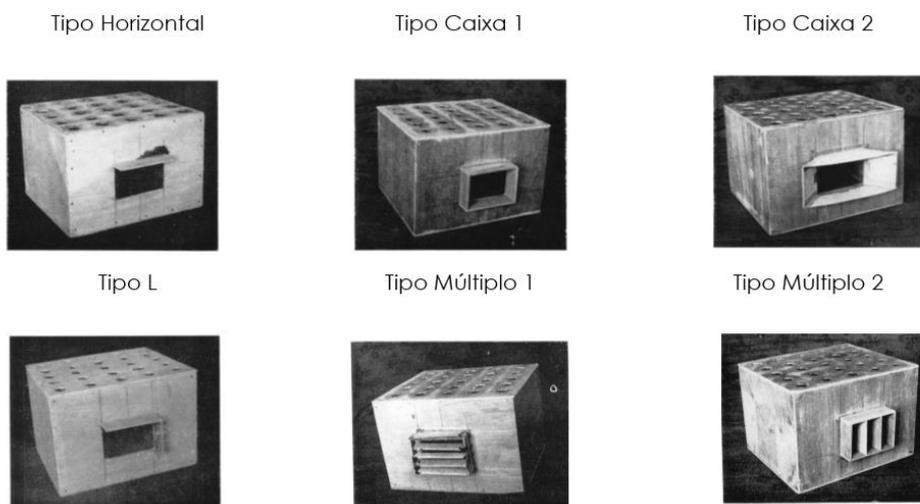


Figura 39 - Configurações dos dispositivos de sombreamento estudados. Fonte: chand e Krishak (1971).

Na análise dos resultados, todos os casos foram comparados com um caso-base (sem dispositivo de sombreamento). A Figura 40 ilustra parte dos resultados apresentado neste estudo.

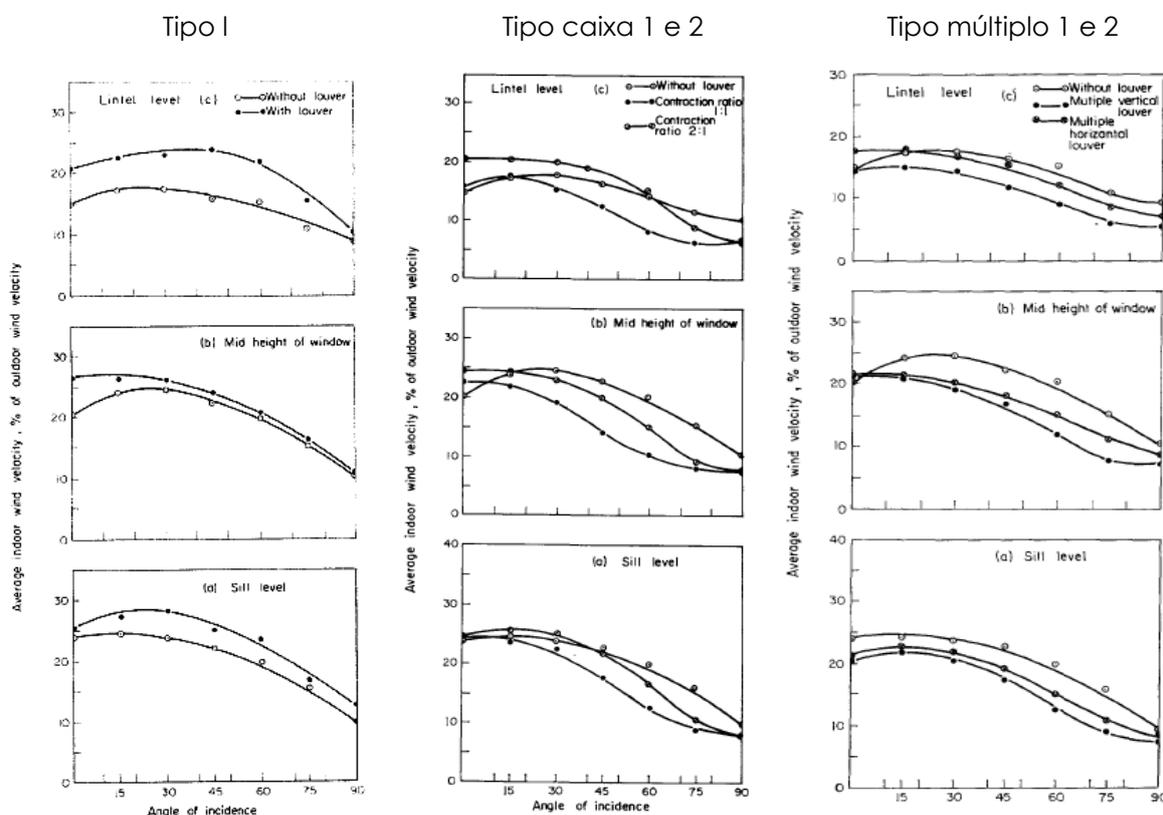


Figura 40 - Efeito do dispositivo de sombreamento (tipo L, caixa, múltiplo) na média de velocidade interna do vento. Fonte: Chand e Krishak (1971).

Principais conclusões: Os resultados mostraram que, para todos os casos houve mudanças na velocidade e na distribuição do vento. Os casos mais relevantes foram os que combinaram configurações de dispositivos de proteções solares horizontais e verticais, (tipo "L", tipo caixa ou tipo múltiplo). O dispositivo tipo "L" para ângulos de incidência do vento de 0° até 90°, exerceu maior influência no aumento na velocidade do ar quando comparado aos demais casos. Para os autores, esse incremento ocorreu em decorrência do desvio no fluxo do ar no interior do ambiente dado pelo elemento vertical, embora destacando que, para ângulos maiores que 90° o efeito poderá ser o contrário. Para os dispositivos de sombreamento tipo caixa, houve uma aceleração para o vento perpendicular; já para os ângulos oblíquos, observou-se reduções tanto na velocidade quanto na distribuição do ar. Os dispositivos de sombreamento tipo múltiplo, foram os que

tiveram as maiores reduções na velocidade do ar para todos os ângulos de incidência do vento (CHAND; KRISHAK, 1971).

- Bittencourt, Biana e Cruz (1995)

Objetivo: analisar de forma conjunta a ventilação natural e os dispositivos de sombreamento.

Metodologia: O objeto de estudo utilizado foi uma sala de aula de geometria simples (6m X 6m X 3m), analisada para um ângulo de incidência do vento a 45°. Para a obtenção dos dados foi utilizado simulações em programa CFD. Os parâmetros analisados foram os padrões de fluxo do vento (velocidade do ar, direção e distribuição do vento).

Principais conclusões: a Figura 41 apresenta o efeito produzido por diferentes espaçamentos dos dispositivos de sombreamento horizontais, e a Figura 42 apresenta a influência da projeção de dispositivos de proteção solar horizontais para diferentes dimensões. Foi observado que reduzir o espaçamento entre as placas horizontais que compõem os dispositivos de sombreamentos produz uma redução da velocidade do ar, mas promove uma distribuição do vento no interior mais uniforme. Quanto à projeção em sentido horizontal destes dispositivos, estes podem alterar as velocidades do vento no interior, embora não foram registrados mudanças em relação à distribuição do vento no interior.

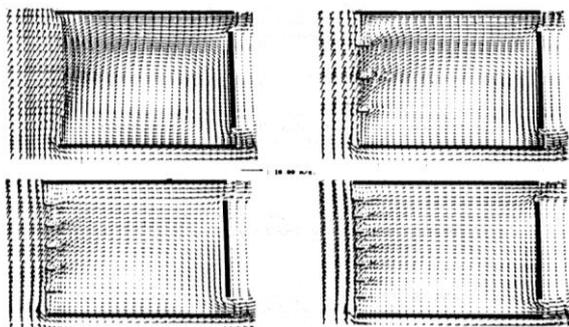


Figura 41 - Efeito produzido por diferentes espaçamentos de dispositivos de proteção solar. Fonte: Bittencourt, Biana e Cruz (1995).

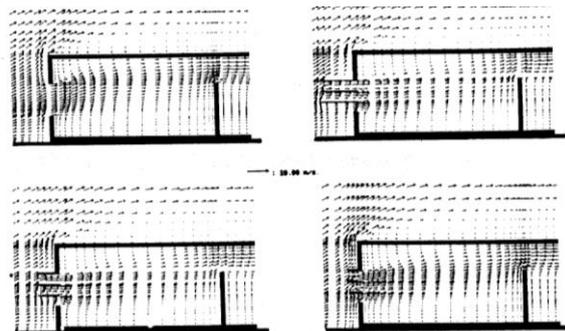


Figura 42 - Influência de diferentes projeções de protetores horizontais. Fonte: Bittencourt, Biana e Cruz (1995).

- Kindangen, Krauss e Depecker (1997)

Objetivo: analisar o efeito da forma do telhado na ventilação natural pela ação dos ventos no interior de uma edificação térrea.

Metodologia: Foram estudados 10 modelos com diferentes geometrias de telhado dentre as quais 7 incluíam configurações com varandas de 1,2m de projeção, conforme Figura 43. O estudo foi realizado por meio de simulações em programa CFD. As variáveis analisadas foram coeficientes de velocidade e distribuição do ar.

Principais conclusões: Para o modelo com projeção da laje em forma horizontal (modelo 2) observou-se somente um aumento relevante no coeficiente de velocidade para ângulos de incidência do vento de 0° (variação entorno de 39%). Já para os ângulos de incidência 30° e 45° houve uma variação da ordem de 10% e 7% respectivamente. Em geral foi observado maior influência nos coeficiente de velocidade para os modelos com varanda nos ângulos de incidência do vento menores a 30° .

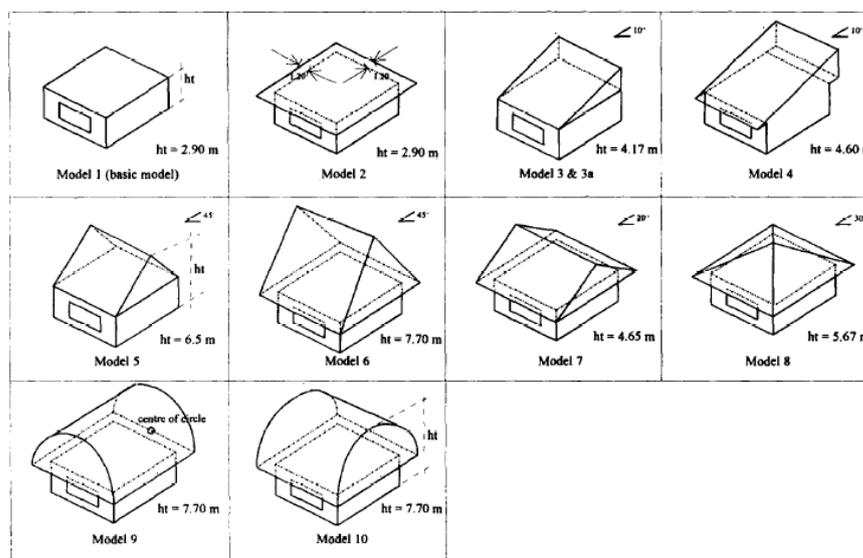


Figura 43 - Configurações de telhados. Fonte: Kindangen, Krauss e Depecker (1997)

- Prianto e Depecker (2002)

Objetivo: avaliar as características do fluxo do ar pelo efeito gerado por diferentes configurações de varandas para uma habitação de baixa altura, em um contexto urbano de um clima tropical.

Metodologia: Os autores mediram as velocidades internas do ar para 33 modelos que combinam diversas configurações (entre varanda, tipo de janela e divisões internas) para uma abertura posicionada a barlavento. A Figura 44 ilustra os modelos empregados. Esse estudo foi realizado por meio de programas de simulação CFD (N3S program).

Principais conclusões: características tais como colocação e arranjo, assim como disposições internas e tipo de abertura exercem uma grande influência no fluxo do ar interno, especialmente na velocidade do ar atingida no ambiente. Foi observado também que os casos que obtiveram uma maior aceleração do vento no interior, foram aqueles em que as janelas com tamanhos menores estavam a barlavento. Para os autores, este fenômeno é explicado pelo efeito Venturi gerado no espaço interno da edificação. Alguns dos casos destacados por registrarem as maiores velocidades do ar no interior da edificação foram os que combinaram aproximadamente 60% de porosidade da parede com janelas tipo veneziana (composta por aletas horizontais) e os casos com janelas pivotantes com sua folha inclinada a 45°.

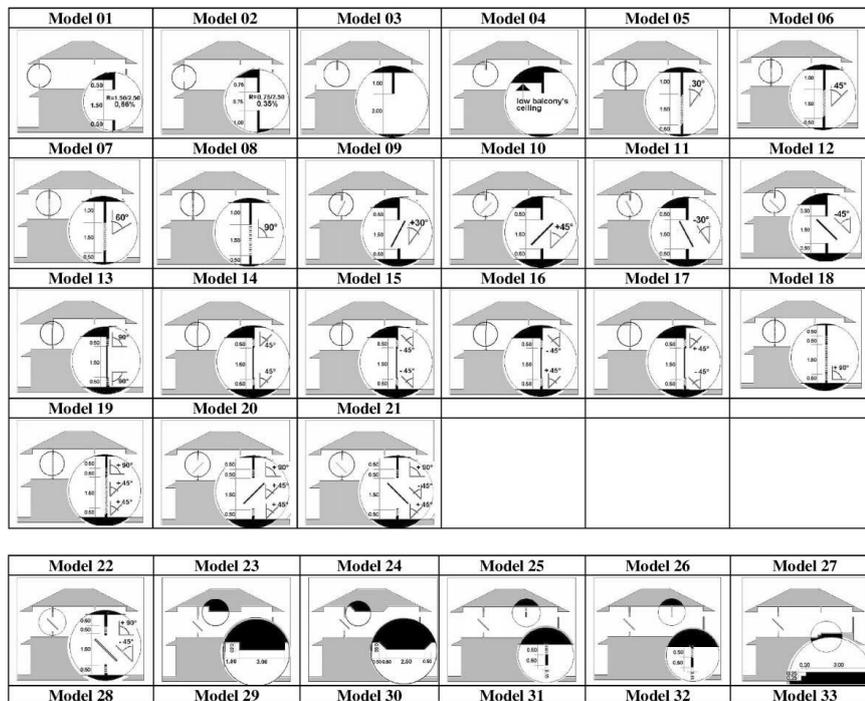


Figura 44 - Modelos 01-02 sem varanda; modelos 03-21 combinações de varandas e tipos de janelas; modelos 22-33 alternativas com diferentes configurações internas.

Fonte: Prianto e Depecker (2002).

- Accioly, Oliveira e Bittencourt (2016) e Bittencourt et al., (2007)

Objetivo: Analisar o possível impacto no fluxo do vento pela proximidade de elementos arquitetônicos à janela.

Metodologia: Os elementos arquitetônicos estudados foram prateleiras de luz para Accioly, Oliveira e Bittencourt (2016) e os peitoris ventilados para Bittencourt et al., (2007). Para os autores, estes elementos são interessantes na arquitetura como

alternativas passivas para refrigeração e iluminação de edificações em climas tropicais. Enquanto o trabalho de Accioly, Oliveira e Bittencourt (2016) realizou análises qualitativas a partir de ensaios na mesa *d'água*, pelo método de visualização análoga, o estudo do Bittencourt et al., (2007), executou avaliações de tipo quantitativa e qualitativas, decorrentes de simulações computacionais em programas CFD e medições no local.

Principais conclusões: ambos os estudos demonstraram a viabilidade do uso conjunto destes elementos quando bem projetados, com a ventilação natural. Outro destaque foi o direcionamento obtido por estes elementos no fluxo do vento para atingir o nível do usuário. Já particularmente para algumas configurações de peitoris ventilados estes elementos conseguiram aumentar a velocidade do vento no interior do ambiente analisado.

2.5.2. Estudos sobre muros e sua influência na ventilação natural

Alguns trabalhos que abordam esta temática são Chang (2006) e Chang e Cheng (2009).

- Chang (2006)

Objetivo: Este estudo analisou o efeito de um muro (cerca viva) na frente de uma habitação de dois andares (ver Figura 45).

Metodologia: o método utilizado foi baseado em modelos 3D mediante simulações em programa CFD. Os parâmetros variáveis foram: (1) altura do muro, (2) espaçamento da fachada, e (3) e diferentes índices de porosidades.

Principais conclusões: Para os três parâmetros de variação, foram observadas mudanças nas estruturas do fluxo do vento depois de interatuar com o muro. As menores alterações foram observadas em situações com o muro de menor altura e maior distância. A Figura 46 apresenta o efeito da disposição do muro de fechamento (altura e distância) na ventilação natural. Por outro lado, foi observado também um aumento do efeito de obstrução quando as porcentagens de porosidade foram reduzidas (muro opaco). Um destaque deste estudo foi a caracterização do efeito do muro para diferentes índices de porosidades na ventilação cruzada no interior da habitação, conforme a Figura 47. Sendo o índice de porosidade 1 sem a presença de muro e 0 para um muro sólido, a saber: (a) ventilação cruzada efetiva (casos com índices de porosidade do muro próximo a

1); além de não apresentar grandes alterações da ventilação natural interna, foi apontado uma melhor distribuição dos fluxos do vento no interior. (b) Ventilação natural anulada (casos com índices de porosidade do muro próximos a 0,3); foi distinguido um índices de porosidade crítico, situação na qual, foi estagnada a ventilação natural no interior da edificação. (c) Ventilação natural invertida (casos com índices de porosidade do muro próximos a 0); o efeito observado nos casos com muros opacos, na ventilação natural foi a alteração da entrada do vento na edificação. Nestes casos as janelas localadas a sotavento tiveram a função de entrada de ar. Produto do efeito do muro nas pressões na edificação, as janelas a barlavento registraram pressões menores que suas homologas de sotavento.

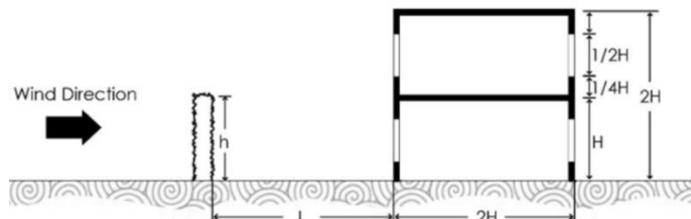


Figura 45 - Esquema do modelo 3D. Fonte: Chang (2006).

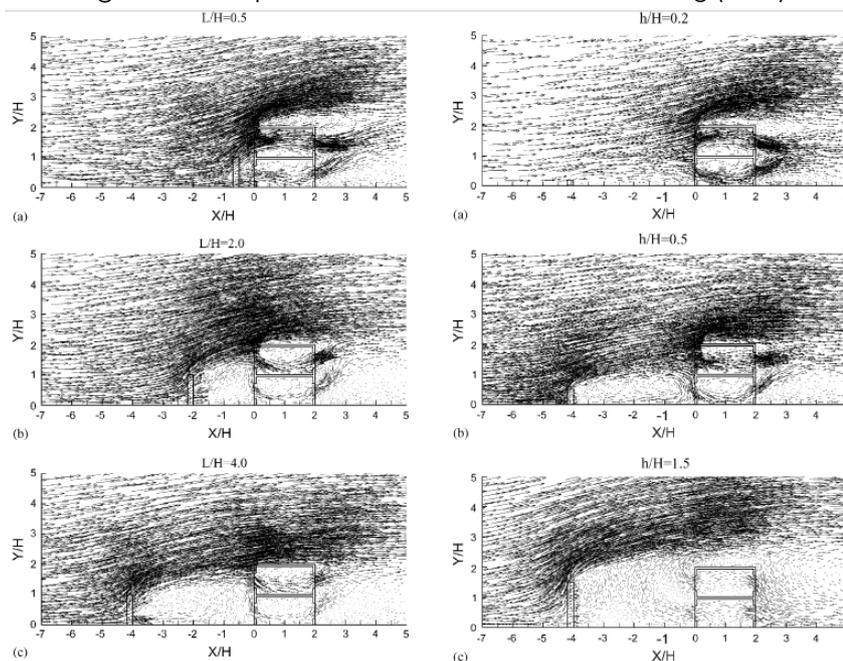


Figura 46 - Efeito da disposição do muro de fechamento (distância e altura) nos fluxos do vento ao redor da edificação. Fonte: Chana (2006).

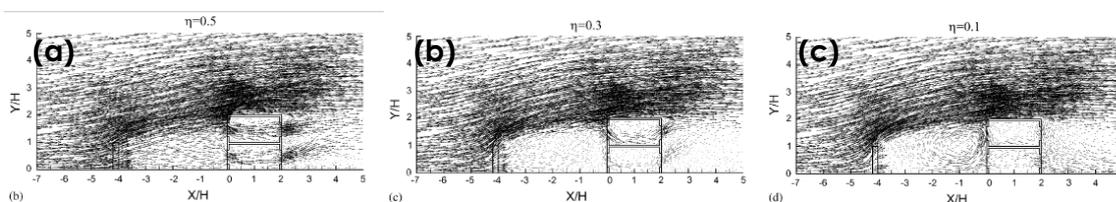


Figura 47 - Efeito no fluxo do vento na ventilação natural de uma edificação para diferentes índices de porosidade do muro, (a) 0,5, (b) 0,3, (d) 0,1. Fonte: Chang (2006).

- Chang e Cheng (2009)

Objetivo: analisar os efeitos pela ação dos ventos em uma edificação térrea e isolada pela presença de um muro na sua frente (cerca viva) para diferentes índices de porosidade (ver Figura 48).

Metodologia: as análises foram realizadas a partir de simulações com modelos 3D em programas CFD.

Principais conclusões: Os resultados apresentados por este estudo foram similares aos descritos pelo estudo de Chang (2006), em relação à caracterização dos efeitos na ventilação natural para diferentes índices de porosidade do muro (ventilação cruzada efetiva, ventilação invertida e ventilação anulada). A Figura 49 apresenta uma comparação (em corte) da velocidade do fluxo médio para índices de porosidade baixo e alto, que correspondem as categorias de ventilação cruzada efetiva e ventilação invertida respectivamente.

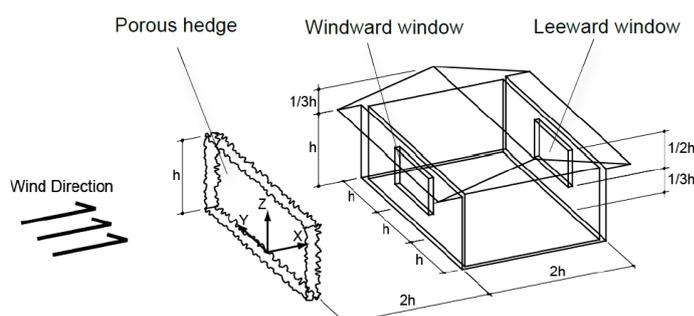


Figura 48 - Esquema do modelo 3D. Fonte: Chang e Cheng (2009).

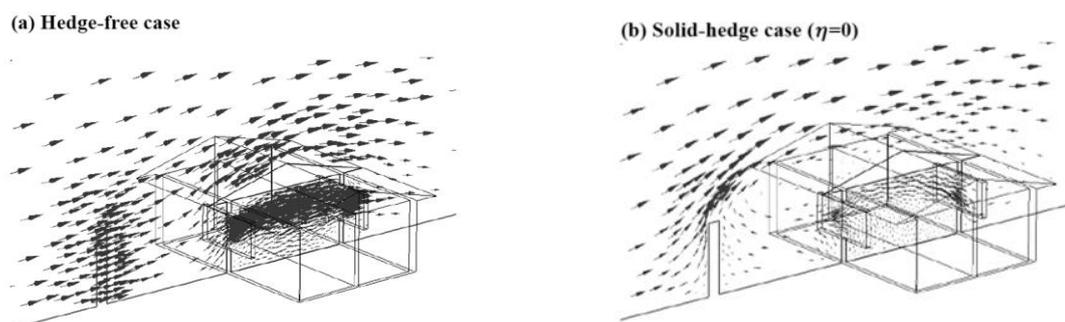


Figura 49 - Comparação do fluxo médio da velocidade em corte para (a) índice de porosidade baixo e (b) alto. Fonte: Chang e Cheng (2009).

2.5.3. Estudos relacionado à ventilação natural e coeficientes de pressão

- Chand, Bhargava e Krishak (1998)

Objetivo: analisar a distribuição dos C_p na envoltória pela força dos ventos na fachada devido ao uso de sacadas.

Metodologia: foram realizados testes em túnel de vento para obtenção do C_p em três linhas da fachada a barlavento e a sotavento (eixo lateral direito, central, lateral esquerda). O modelo empregado representa uma edificação composta por cinco andares, conforme apresentado nas Figuras 50 e 51.

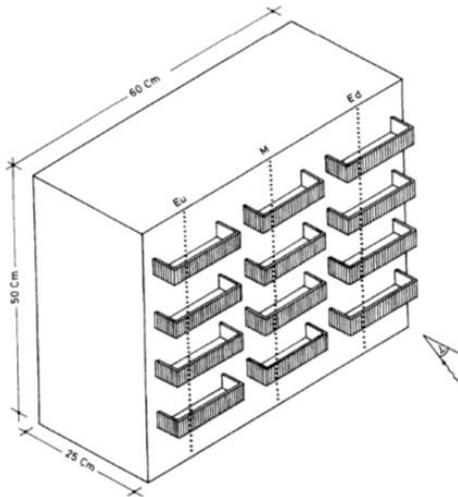


Figura 50 - Eixos de tomada de C_p no modelo objeto de estudo. Fonte: Chand, Bhargava e Krishak (1998).

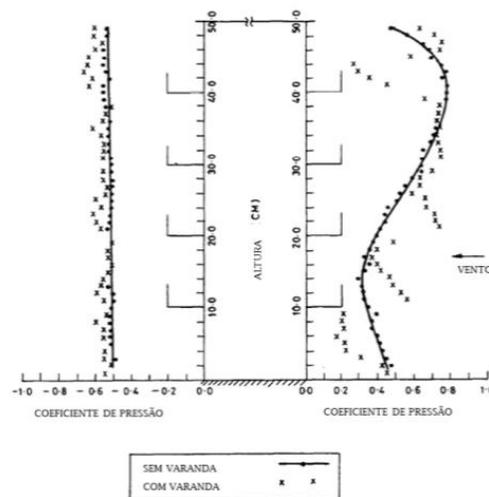


Figura 51 -Variação dos C_p em diferentes alturas de sacadas nos eixos Eu e Ed. Fonte: Chand, Bhargava e Krishak (1998).

Principais conclusões: (1) ao redor da fachada a barlavento houve as maiores variações em conjunto dos valores de C_p pelo uso das sacadas, enquanto que para a fachada a sotavento teve variações, mas estas não foram tão significativas quanto a barlavento; (2) na fachada a barlavento observou-se que houve uma redução dos valores dos C_p s no nível térreo, ocorrendo o mesmo nos pontos cobertos pela sacada no nível superior, enquanto que houve um aumento destes nos níveis intermediários e na parte superior da edificação; (3) em relação à influência da força dos ventos, destacou-se a atuação das sacadas no aumento do diferencial de pressão entre diferentes pontos da fachada a barlavento, porém quando se comparou os diferenciais de pressão entre fachadas a barlavento e a sotavento, observou-se que não houve uma mudança significativa na força dos

ventos através dos espaços internos devido ao diferencial de pressão entre aberturas (CHAND; BHARGAVA; KRISHAK, 1998).

- Montazeri Blocken (2013)

Objetivo: realizar uma avaliação sistemática das distribuições das pressões médias do vento para uma edificação de 5 andares com e sem sacadas.

Metodologia: as características geométricas do objeto de estudo foram baseadas no trabalho de Chand, Bhargava e Krishak (1998) (ver Figura 50). Este estudo foi realizado por meio de modelos 3D em um programa CFD, e validados posteriormente a partir dos dados aferidos em túnel de vento de CLA para ângulos de incidência do vento de 0 e 45° oriundos do estudo de Chand, Bhargava e Krishak (1998).

Principais conclusões: os resultados apontaram uma correspondência dos dados obtidos a partir do programa CFD para as zonas a barlavento dos modelos com e sem sacadas. No entanto, para incidência de ventos oblíquos na zona a sotavento os resultados mostraram grandes discrepâncias. Igualmente este estudo indicou grandes alterações nas pressões da fachada a barlavento pela presença das sacadas.

- Perén et al. (2015)

Objetivo: avaliar o impacto de variadas configurações de beirais (localizadas nas zonas a barlavento e sotavento) na ventilação natural pela ação dos ventos.

Metodologia: foram realizadas simulações em programas de dinâmica dos fluidos (CFD). A calibração foi feita através de dados coletados em túnel de vento. Os parâmetros analisados foram a taxa de fluxo de ar e a velocidade interna média.

Principais conclusões: beirais localizadas a barlavento com ângulos de inclinação menores a 0° aumentam a taxa de renovações de ar, quando comparado com o caso de referência. Dentro destes casos o maior aumento encontrado foi de 15% com beirais com ângulo de inclinação de -27°. Para beirais localizados em sotavento da edificação, ângulos de 45° e 90° aumentaram este fluxo entre 5 e 6% respectivamente.

Os efeitos combinados de beirais com ângulos como -27° ou -45° na barlavento e de 45° e 90° na zona de sotavento atingiu maiores taxas de fluxo de ar que a soma de ambos efeitos individuais. O aumento acima da somatória foi de 3%.

- Maruta, Kanda e Sato (1998) e Stathopoulos e Zhu (1988)

Existem outros autores como Maruta, Kanda e Sato (1998) Stathopoulos e Zhu (1988) que estudaram a influencia da rugosidade das envoltórias da edificação na ventilação natural. Elementos arquitetônicos tais como sacadas, peles duplas, ou texturas da fachada foram analisadas observando seu impacto nos Cps. Para ambos os trabalhos os achados indicaram mudanças nas pressões do vento na superfície da edificação. Porém, para cada estudo foram obtidos impactos nas pressões distintos, em função do elemento estudado.

3. MÉTODO

3.1. Estrutura geral

A metodologia deste trabalho está dividida em três etapas, como é ilustrado na Figura 52: (1) definição das condições do estudo (clima, edifício, elementos externos à fachada escolhidos e casos de estudo); (2) coleta de dados; e (3) pós-processamento e análises de dados. Tais etapas serão apresentadas em detalhes nos itens 3.2, 3.3, e 3.4, respectivamente.

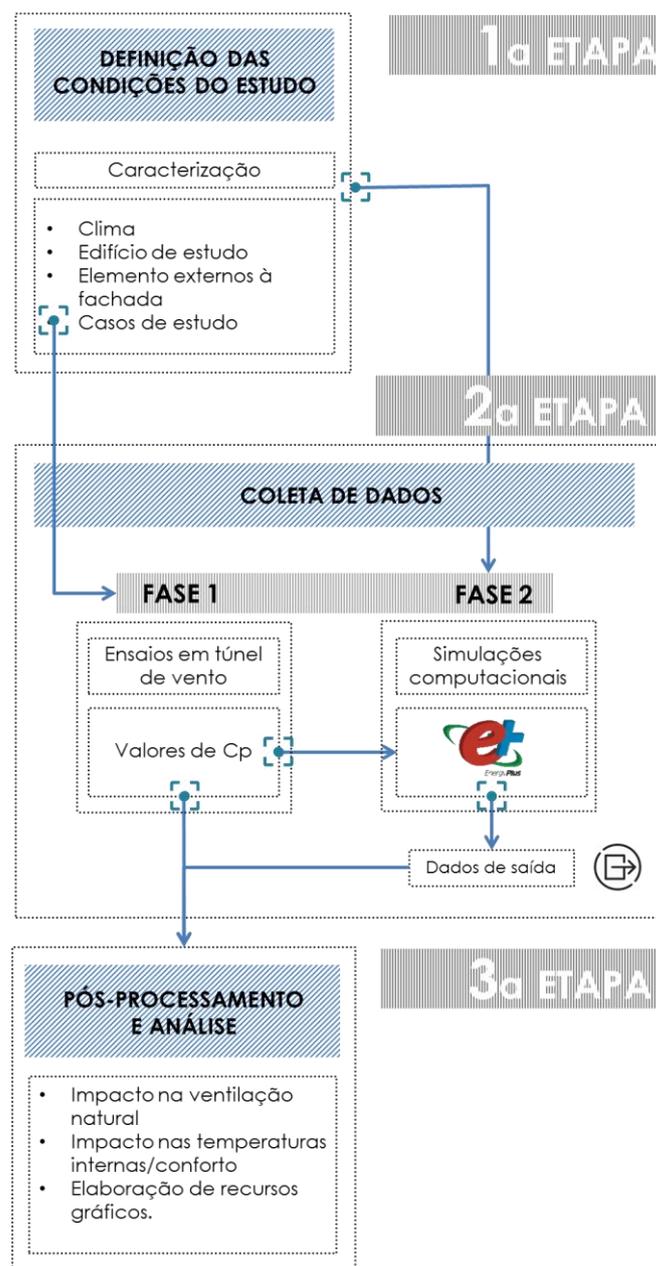


Figura 52 - Esquema geral do método.

3.2. Etapa 1: Definição das condições do estudo

3.2.1. Caracterização do clima

O local escolhido para o desenvolvimento desta pesquisa é a cidade de Natal, capital do estado do Rio Grande do Norte (RN), localizada na região litorânea do Nordeste do Brasil. Segundo o zoneamento bioclimático brasileiro ABNT (2005c-3), esta cidade pertence à zona 8, para a qual são recomendadas estratégias passivas como: ventilação cruzada e sombreamento das aberturas constante ao longo do ano. Neste sentido, esta cidade é um exemplo de um local onde é requerido o uso conjugado de sombreamento e ventilação natural para resfriamento, e onde são necessárias velocidades de ventos comparativamente mais altas quando comparadas com outras regiões do país, para se proporcionar conforto térmico aos usuários (CÂNDIDO et al., 2010).

O Quadro 1 apresenta o resumo das principais características do clima para a cidade de Natal. A informação ilustrada foi gerada a partir da inserção do arquivo climático .epw no programa *EPview* (RORIZ; RORIZ, 2015). O arquivo climático utilizado foi o disponibilizado na página do Laboratório de Eficiência Energética de Edificações da Universidade Federal de Santa Catarina - LabEEE (2015). De forma semelhante ao indicado pela norma ABNT (2005c-3), o diagrama bioclimático de Givoni (1992) do Quadro 1, recomenda o uso da ventilação natural para a cidade de Natal-RN em 53% das horas do ano (ventilação mais ventilação noturna). A carta solar para esta cidade indica uma trajetória aparente do sol com pouca variabilidade no ano. A rosa dos ventos aponta frequências predominantes dos ventos entre Leste e Sudeste em 36% do ano, e Nordeste de 11%, com velocidades médias que oscilam entre 3,9 até 4,7 m/s. Pode-se observar também que as temperaturas médias mensais do ar são praticamente constantes, com baixa amplitude, altas temperaturas e umidade relativa do ar média na ordem de 60 a 80%.

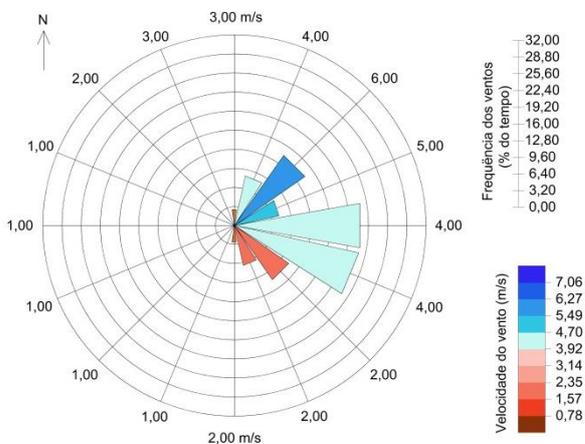
NATAL/ RN BRASIL



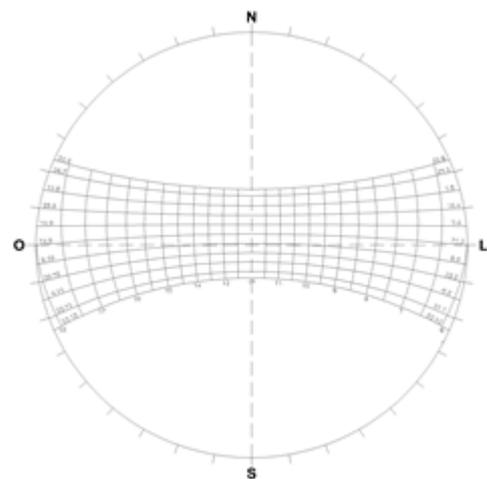
Latitude:
05°47'42'' Sul

Longitude:
35.21° Oeste

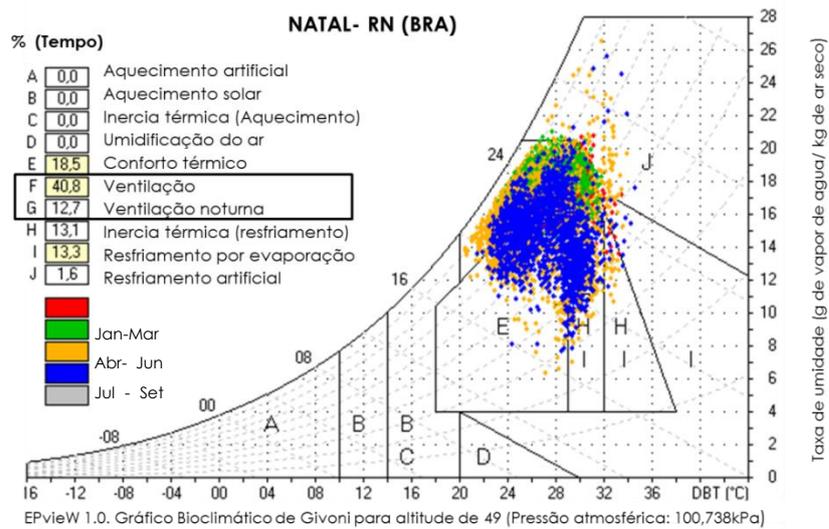
Altitude:
30 m



Rosa dos ventos anual. Fonte: EPview Beta, Roriz e Roriz (2015b).



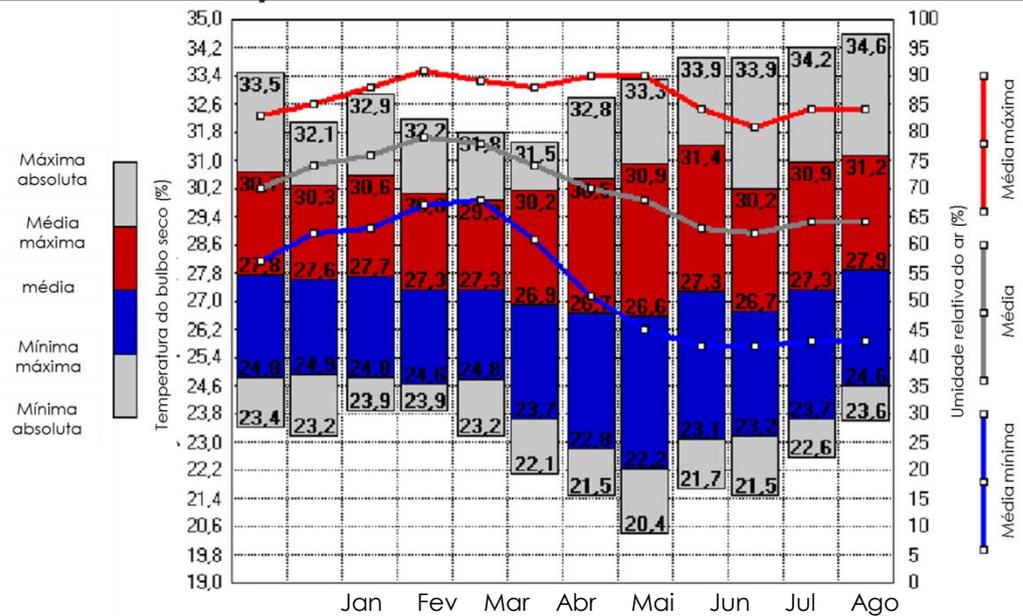
Carta solar latitude 6° Sul. Fonte: Frota e Schiffer (2001).



EPview 1.0. Gráfico Bioclimático de Givoni para altitude de 49 (Pressão atmosférica: 100,738kPa)

Diagrama Bioclimático de Givoni (1992) para a cidade de Natal-RN .
Fonte: EPview Beta, Roriz e Roriz (2015b).

Quadro 1 - Panorama do clima de Natal –RN



Médias máximas e mínimas mensais das temperaturas externas e umidade relativa.
Fonte: EPview Beta, Roriz e Roriz (2015b).

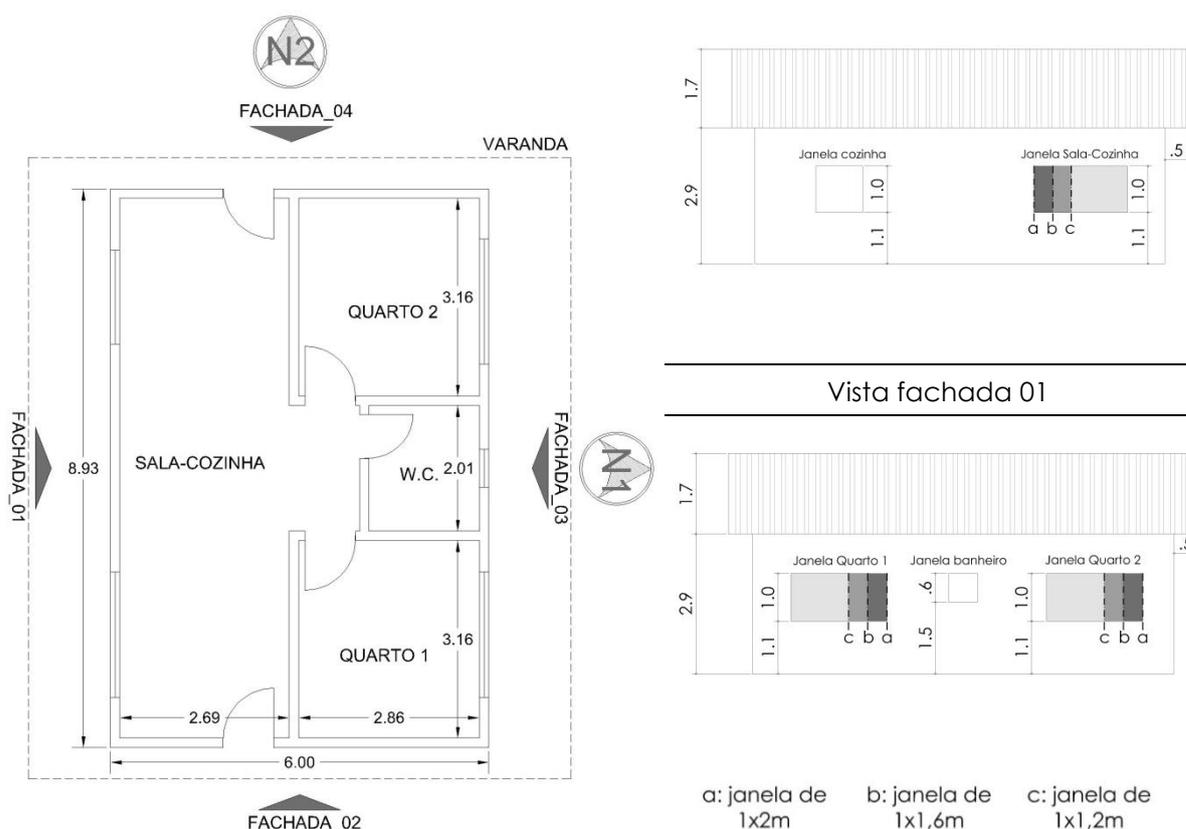
Quadro 1 - Panorama do clima de Natal –RN (continuação)

3.2.2. Edifício de estudo

Este trabalho tem como objeto de estudo uma habitação de interesse social, localizada em uma zona suburbana da cidade de Natal-RN. A geometria foi definida por Anchieta (2016), Favretto (2016) e Rossi (2016) a partir de um levantamento de projetos de habitação de interesse social (HIS) representativos das unidades habitualmente construídas no Brasil. Para estabelecer as características desta habitação, as autoras consultaram projetos habitacionais oriundos de diversas fontes (companhias habitacionais, concursos, premiações, etc.) e em vários estados. Nesse levantamento, foram considerados aspectos tais como: (1) localização; (2) área construída; (3) soluções construtivas; e (4) características arquitetônicas (incluindo relação de largura e comprimento, altura do pé direito, número de pavimentos e quartos, existência de beirais e áticos). Outros aspectos observados em relação à ventilação natural foram: (1) distribuição das janelas; (2) possibilidade da ventilação cruzada; (3) tipo de janela, dimensões e abertura efetiva; (4) partições internas (5) existência de elementos externos de sombreamento.

Quadro 2 ilustra as características arquitetônicas desta habitação. Trata-se de uma unidade unifamiliar com área construída total de 53,5 m², térrea, naturalmente ventilada e sem geminação, telhado inclinado de duas águas com ático não ventilado e beirais em todas as fachadas. Ela é composta por sala e cozinha conjugadas, dois quartos, e um banheiro.

PLANTAS E VISTAS



Orientações/ Tipologia arquitetônica

Vista fachada 03

Quadro 2 - Características arquitetônicas do edifício estudado

Essa geometria sofre variação em relação aos seguintes aspectos:

- Tamanho das janelas:

Foram consideradas três dimensões (1,00 x 1,20 m; 1,00 x 1,60 m; 1,00 x 2,00m) para os ambientes de maior permanência (sala-cozinha⁴ e quartos), conforme o

⁴ O ambiente da sala-cozinha possui duas janelas, a janela de análise corresponde à locada no espaço da sala.

Quadro 2. Foi mantida a mesma altura de peitoril da janela, variando-se somente o seu comprimento. A janela de menor dimensão corresponde às dimensões padrão observadas no levantamento de projetos de HIS anteriormente mencionado (ANCHIETA, 2016; FAVRETTO, 2016; ROSSI, 2016).

- Orientação:

Foram avaliadas duas orientações em relação ao norte, N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste), como é indicado no

Quadro 2. A análise da orientação foi baseada em dois critérios: a primeira orientação (N1) corresponde à com menor ganho de calor solar, considerando a trajetória solar para a latitude de 6° Sul. Neste caso, as faces maiores da edificação estão orientadas à Norte e à Sul. A segunda alternativa (N2) corresponde à melhor orientação com relação à incidência dos ventos predominantes. Neste sentido, a habitação foi disposta com as janelas a barlavento (Leste) e a sotavento (Oeste), a fim de captar os ventos predominantes (Leste, Sudeste e Nordeste).

- Elementos externos à fachada: descritos no item a seguir (3.2.3).

3.2.3. Elementos externos à fachada

Os elementos externos à fachada considerados foram variados dispositivos de sombreamento externos nas janelas dos ambientes de maior permanência (sala-cozinha e quartos) e muro, localizado ao longo do perímetro do terreno. Eles foram categorizados da seguinte forma: (a) dispositivos de sombreamento horizontais; (b) dispositivos de sombreamento especiais (tipo "L", e varanda); e (c) muro de fechamento.

A escolha da geometria dos dispositivos de sombreamentos baseou-se no possível impacto dos mesmos na ventilação natural. Para isto, foi considerados os casos referenciados pela literatura científica (CÂNDIDO; BITTENCOURT, 2008; CHAND; KRISHAK, 1971; CHANG, 2006; CHANG; CHENG, 2009; HIEN; ISTIADJI, 2003; OLGAYAY, 1998; PRIANTO; DEPECKER, 2002).

Quanto ao seu dimensionamento, a metodologia utilizada foi a proposta por Frota e Schiffer (2001). Para cada tamanho de janela, as dimensões dos dispositivos variaram, de modo a se manter a mesma máscara de sombra. Além disso, foi

definida apenas uma máscara para cada geometria de dispositivo, que proporciona sombreamento efetivo nas duas orientações: N1 (Norte-Sul), e N2 (Leste-Oeste), para a cidade de Natal-RN. Exceção ocorre para o dispositivo tipo "L", que foi dimensionado apenas para a orientação N1 (Norte-Sul).

3.2.3.1 Categoria: dispositivos de sombreamento horizontais

Para este grupo foram estabelecidos três tipos de dispositivos de sombreamento horizontais; básico, afastado e veneziana. A máscara de sombra correspondente a cada um deles e suas dimensões são apresentadas no Quadro 3.

- Dispositivo de sombreamento horizontal básico

Composto por uma placa localizada logo acima da janela, e com prolongamento em ambas as extremidades de forma uniforme. Este dispositivo representa a geometria mais básica entre os dispositivos de proteção solar horizontal incluídos neste estudo.

- Dispositivo de sombreamento horizontal afastado

Possui um espaçamento de 0,2 metros entre a placa horizontal e a parede. A distância entre as extremidades superior da janela e da placa em corte é a mesma do tipo horizontal básico, o que resulta em uma máscara de sombra similar à do tipo horizontal básico, conforme o Quadro 3. Esta configuração é mencionada por alguns autores como capaz de direcionar os fluxos do vento no nível do usuário, produto de mudanças das pressões ao redor das aberturas (CÂNDIDO; BITTENCOURT, 2008; GIVONI, 1976; OLGAY, 1998).

- Dispositivo de sombreamento horizontal tipo veneziana

Formado por quatro superfícies horizontais sucessivas (tipo aletas) localizadas na frente da janela, resultando na mesma máscara de sombra do tipo horizontal básico. Este dispositivo representa o caso com maior área de obstrução para a entrada de ar na edificação. Para Cândido e Bittencourt (2008), Chand e Krishak (1971), e Olgay (1998) a configuração deste dispositivo apresenta alterações na distribuição dos fluxos e velocidades do vento incidente.

Dispositivos de sombreamento horizontais												
Máscara de sombra horizontal básico e veneziana: orientação Norte-Sul				Máscara de sombra horizontal básico e veneziana: orientação Leste-Oeste								
		Geometria		Dimensões dos elementos/ tamanho de janela								
Elemento	Planta	Vista	Corte	1x1,2m			1x1,6m			1x2m		
				a (m)	b (m)	c (m)	a (m)	b (m)	c (m)	a (m)	b (m)	c (m)
Horizontal Básico				2,57	0,71	-	2,97	0,71	-	3,37	0,71	-
Horizontal Afastado				2,57	0,71	0,2	2,97	0,71	0,2	3,37	0,71	0,2
Horizontal veneziana				1,43	0,28	-	1,83	0,28	-	2,23	0,28	-

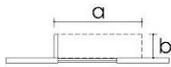
Quadro 3 - Máscaras de sombra e características geométricas e dimensionamento dos dispositivos de sombreamento horizontais

3.2.3.2 Categoria: dispositivos de sombreamento especiais

Nesta categoria têm-se o dispositivo tipo "L" e a varanda.

- Dispositivo de sombreamento tipo "L" :

Este dispositivo combina superfícies horizontais e verticais. O Quadro 4 apresenta as suas dimensões para cada tamanho de janela, bem como sua máscara de sombra. Este dispositivo foi projetado somente para a orientação Norte-Sul do edifício, de modo que possa capturar os ventos de maior frequência (Leste/Sudeste, ver o Quadro 1) e consiga fornecer um sombreamento eficaz no período da tarde. Este dispositivo foi adotado tendo como referência o trabalho de Chand e Krishak (1971), no qual foram registradas acelerações do vento no interior pelo uso de dispositivos com esta geometria, e de acordo com os conceitos expostos na literatura científica sobre o uso de superfícies verticais na ventilação natural. Além de ser um dispositivo de sombreamento, este pode funcionar também como captador de ar para o interior da edificação (CÂNDIDO; BITENCOURT, 2008; GIVONI, 1976; OLGAY, 1998).

Dispositivo de sombreamento tipo "L"												
Máscara de sombra: orientação Norte-Sul												
Elemento	Geometria			Dimensões dos elementos / tamanho de janela								
	Planta	Vista	Corte	1x1,2m		1x1,6m		1x2m				
				a (m)	b (m)	c (m)	a (m)	b (m)	c (m)	a (m)	b (m)	c (m)
Tipo "L"				1,99	0,45	-	2,39	0,64	-	2,79	0,83	-

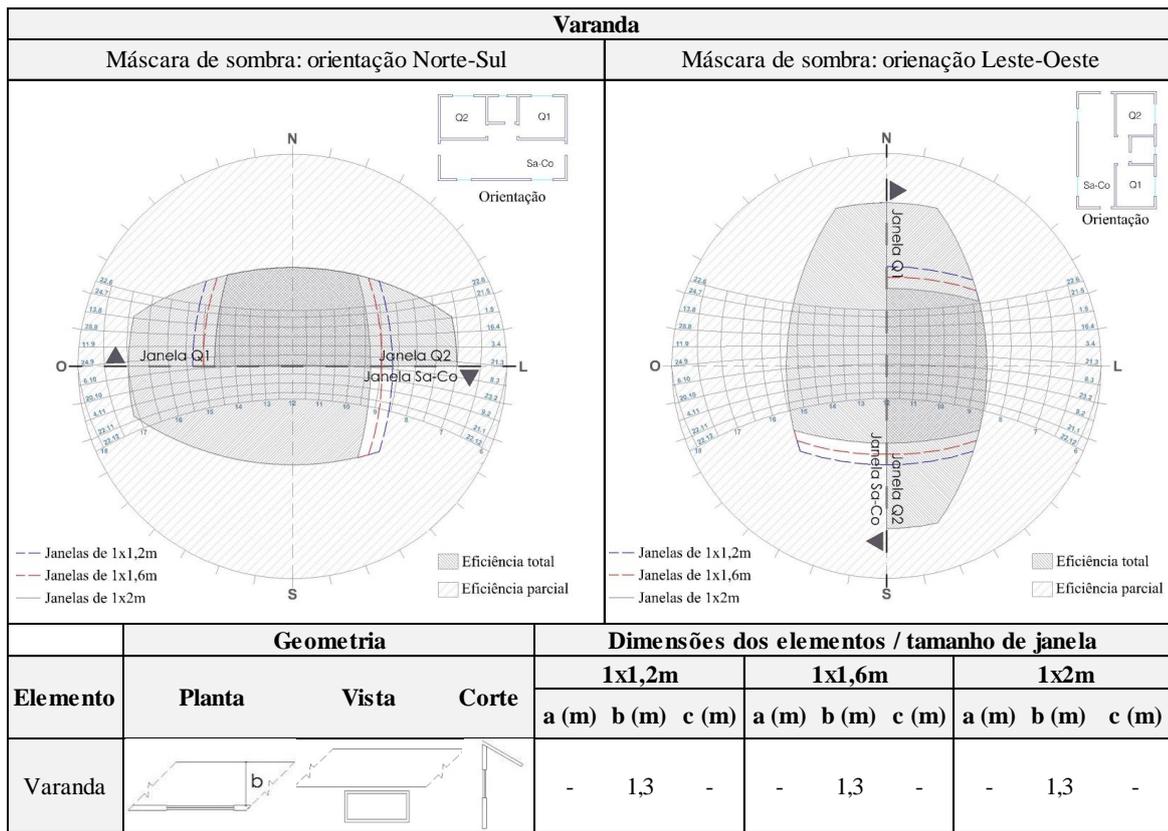
Quadro 4 - Máscara de sombra e características geométricas e dimensionamento dos dispositivos de sombreamento tipo "L".

- Varanda:

As varandas exercem função semelhante à de um dispositivo de sombreamento horizontal, no que se refere ao controle da radiação solar (CÂNDIDO; BITTENCOURT, 2008; CHAND; BHARGAVA; KRISHAK, 1998; PRIANTO; DEPECKER, 2002). O modelo de varanda adotado corresponde ao prolongamento do telhado em 1,3 metros, obedecendo à máscara de sombra e as dimensões indicadas no

Quadro 5. Ela é situada nas duas fachadas de maior comprimento da residência analisada. As máscaras de sombra para este elemento sofrem variações (ângulo gama) em razão da alteração do comprimento da janela, conforme ilustrado no

Quadro 5.

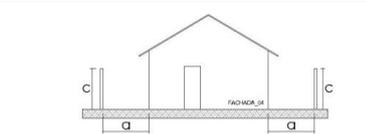
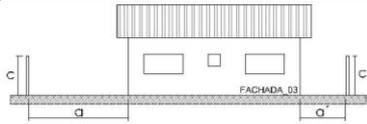


Quadro 5 - Máscara de sombra e características geométricas e dimensionamento da varanda.

3.2.3.3 Categoria: muro de fechamento

Consiste em um muro de fechamento não permeável de 2 metros de altura situado ao longo do todo o perímetro do terreno. O recuo em relação à fachada principal (fachada 02) é de 5 metros. Para as demais fachadas, é de 2,3 metros. Suas características são sempre as mesmas, independente do tamanho das janelas da edificação. Este muro de fechamento é analisado para os três tamanhos de janela como é indicado no

Quadro 6.

Elemento	Geometria			Dimensões dos elementos								
	Planta	Vista	Corte	1X1,2m			1X1,6m			1X2m		
				a (m)	b (m)	c (m)	a (m)	b (m)	c (m)	a (m)	b (m)	c (m)
Muro				2,3	-	2	2,3	-	2	2,3	-	2
				5 (a) 2,3 (a')	-	2	5 (a) 2,3 (a')	-	2	5 (a) 2,3 (a')	-	2

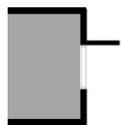
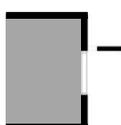
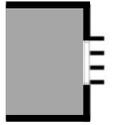
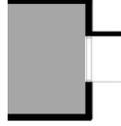
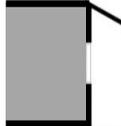
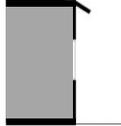
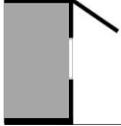
Quadro 6 - Geometria e dimensões do muro de fechamento.

3.2.4. Casos de estudos

Os casos de estudos resultam da combinação das variações dos seguintes parâmetros:

- 2 orientações: N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste), ver item 3.2.2.
- 3 tamanhos de janela para os ambientes de maior permanência (sala-cozinha e quartos): 1,00 x 1,20 m; 1,00 x 1,60 m; 1,00 x 2,00m, ver item 3.2.2.
- 6 elementos externos à fachada: dispositivos de sombreamento horizontal básico, afastado, tipo veneziana, tipo "L", varanda e muro de fechamento, ver item 3.2.3.

Como resultado final foram estudados 45 casos conforme o Quadro 7. Os nomes dos casos seguem a seguinte ordem: (1) elemento externo à fachada, (2) tamanho de janela, e (3) orientação.

Combinação dos parâmetros variados				Casos	
Elementos externos à fachada	Tamanho de janelas (m)	Orientação			
	Sem elementos externos (R)	1X1,2	N1	R_1X1,2_N1	
			N2	R_1X1,2_N2	
		1X1,6	N1	R_1X1,6_N1	
			N2	R_1X1,6_N2	
		1X2	N1	R_1X2_N1	
			N2	R_1X2_N2	
Horizontais		1X1,2	N1	H1_1X1,2_N1	
			N2	H1_1X1,2_N2	
		1X1,6	N1	H1_1X1,6_N1	
			N2	H1_1X1,6_N2	
		1X2	N1	H1_1X2_N1	
			N2	H1_1X2_N2	
		Afastado (H2)	1X1,2	N1	H2_1X1,2_N1
				N2	H2_1X1,2_N2
			1X1,6	N1	H2_1X1,6_N1
				N2	H2_1X1,6_N2
			1X2	N1	H2_1X2_N1
				N2	H2_1X2_N2
	Veneziana (H3)	1X1,2	N1	H3_1X1,2_N1	
			N2	H3_1X1,2_N2	
		1X1,6	N1	H3_1X1,6_N1	
			N2	H3_1X1,6_N2	
		1X2	N1	H3_1X2_N1	
			N2	H3_1X2_N2	
Especiais		Tipo "L" (E1)	1X1,2	E1_1X1,2_N1	
			1X1,6	E1_1X1,6_N1	
			1X2	E1_1X2_N1	
		Varanda (E2)	1X1,2	E2_1X1,2_N1	
				N2	E2_1X1,2_N2
			1X1,6	N1	E2_1X1,6_N1
	N2	E2_1X1,6_N2			
	1X2	N1	E2_1X2_N1		
	N2	E2_1X2_N2			
Muros de fechamento		Muro (RM)	1X1,2	RM_1X1,2_N1	
				N2	RM_1X1,2_N2
			1X1,6	N1	RM_1X1,6_N1
		N2	RM_1X1,6_N2		
		Varanda + Muro (E2_M)	1X1,2	E2M_1X1,2_N1	
				N2	E2M_1X1,2_N2
1X1,6			N1	E2M_1X1,6_N1	
	N2	E2M_1X1,6_N2			
	1X2	N1	E2M_1X2_N1		
	N2	E2M_1X2_N2			
* Combinações ensaiadas no túnel de vento de CLA (etapa 2, fase 1, ver item 3.3.1).			* Casos simulados (etapa 2, fase 2, ver item 3.3.2).		

Quadro 7 - Casos de estudo.

3.3. Etapa 2: coleta de dados

A metodologia nesta etapa é apresentada em duas fases. A primeira é desenvolvida no item 3.3.1 (ensaios em túnel de vento de CLA) e a segunda no item 3.3.2 (simulações computacionais).

Na primeira fase foram conduzidos ensaios experimentais em túnel de vento de CLA para a quantificação de Cps. Já a segunda fase refere-se a simulações computacionais utilizando para a modelagem da ventilação natural os valores de Cps aferidos na fase 1 para cada caso. Assim, foram quantificados variáveis como temperatura interna do ar, taxa de renovações do ar/hora, padrão de abertura de janelas, usadas para as avaliações dos impactos dos elementos externos à fachada na habitação analisada.

3.3.1. Fase 1- Ensaios em túnel de vento de CLA

Este tópico é dividido em quatro partes: (1) descrição do Túnel de Vento de CLA do IPT de São Paulo; (2) construção do modelo; (3) período de ensaios; e (4) ensaios propriamente ditos. Cada uma destas seções são desenvolvidas nos seguintes itens.

3.3.1.1 Descrição do Túnel de Vento de CLA do IPT de São Paulo

Este túnel destaca-se por ser o maior da América Latina, construído em circuito aberto, com 40 metros de comprimento, 3 metros de largura por 2 metros de altura, com duas mesas giratórias em ambos os extremos, que permitem avaliar o impacto do vento para diferentes ângulos de incidência, a Figura 53 apresenta este túnel. Além de dispor de equipamentos e da infraestrutura necessária, o túnel de vento CLA do IPT dispõe de uma equipe experiente para assessorar os estudos sobre soluções tecnológicas em diferentes áreas, dentre as quais se encontram os ensaios de conforto ambiental (térmico, dinâmico e dispersão de contaminantes) (IPT, 2016).



Figura 53 - Túnel de vento do IPT. Fonte o autor

Este túnel é dividido em três partes, conforme a Figura 54: a primeira chamada seção de contração de 5 metros por 4 metros que caracteriza a porção de entrada do ar através de colmeias, telas retificadoras, e trecho de contração, com o objetivo de uniformizar o escoamento em toda a seção. A segunda parte denominada seção de teste é onde são criados os perfis da CLA e estão localizadas as mesas giratórias e são colocados os modelos de ensaio. A mesa giratória disposta para os ensaios de edifícios é a localizada na área próxima ao ventilador (a primeira das mesas está logo depois da seção de contração e é empregada para ensaios que precisamos de pouca intensidade de turbulência e a menor camada limite possível). Por último a parte do difusor que corresponde à zona do ventilador, sua função é sugar o ar do interior do túnel para criar as faixas de velocidades de forma estável. Este ventilador é de tipo axial, com 8 pás móveis de 3 metros de diâmetro (PRATA, 2005).

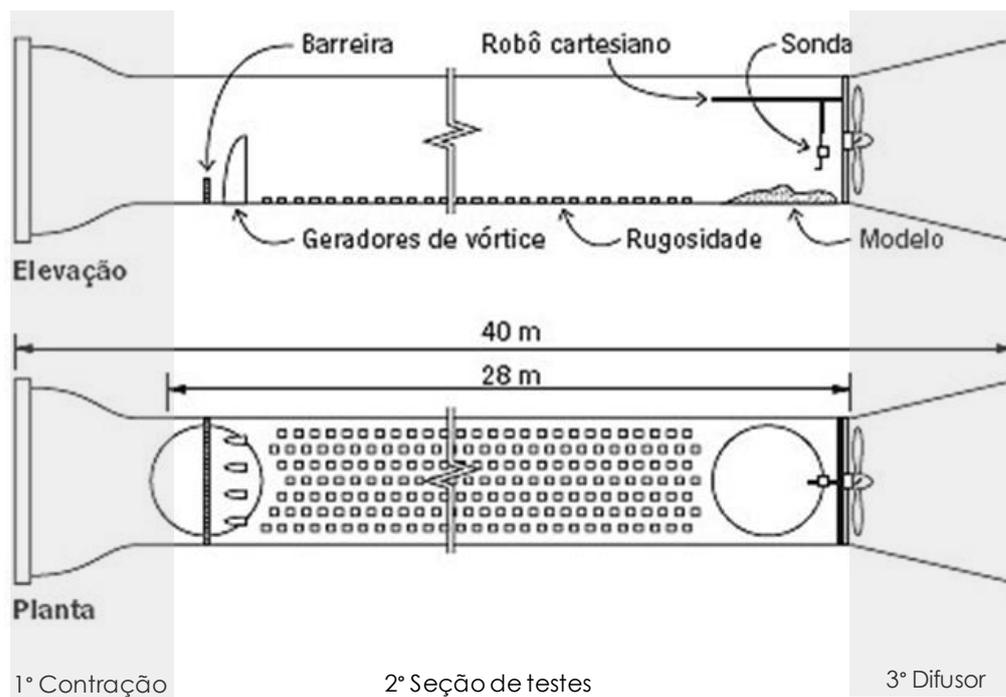
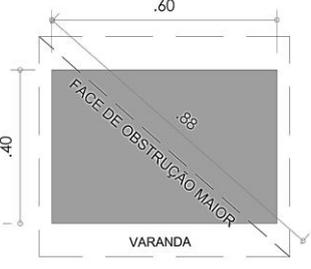
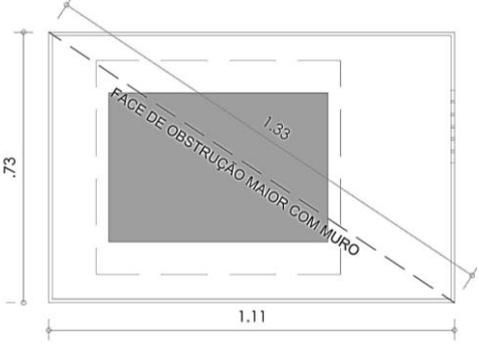


Figura 54 – Corte e planta do túnel de vento de CLA do IPT. Adaptação Cóstola (2006).

3.3.1.2 Construção do modelo

O Quadro 8 apresenta as informações sobre as dimensões e escala do modelo. A escala do modelo reduzido (maquete) foi calculada, com base na metodologia descrita por Kowaltowski et al. (2011). A porcentagem de obstrução

máxima recomendada tanto pela literatura está na ordem de 5%, para a orientação do modelo com maior área de obstrução.

Escala 1:15					
	Dimensões originais (m)	Dimensões do modelo (m)	Dimensões originais com muro (m)	Dimensões do modelo com muro (m)	 Seção do modelo
Altura	4.62	0.31	4.62	0.31	
Largura	6.00	0.40	10.88	0.73	
Comprimento	8.93	0.60	16.58	1.11	
Dimensões do modelo					
Esquema de obstrução maior			Esquema de obstrução para os casos com muro		
					
Planta			Planta		
Área da seção de ensaio (m ²):	6.0	Área da seção de ensaio (m ²):	6.0		
Área com maior obstrução do modelo (m ²):	0.27	Área com maior obstrução do modelo (m ²):	0.31		
Obstrução da seção de ensaio (%):	4.50	Obstrução da seção de ensaio (%):	5.17		

Quadro 8 - Descrição das características do modelo.

Após da definição da escala do modelo a ser utilizado, foram projetadas e planejadas todas as peças no programa AUTOCAD® (AUTODESK, 2014). O modelo foi confeccionado no Laboratório de Modelos e Maquetes do IAU-USP, com a orientação de técnicos experientes no assunto. Este laboratório possui uma cortadora laser, a qual foi empregada para o corte de todas as peças que compõem o modelo conforme ilustra a Figura 55.

O modelo foi elaborado em MDF, já que os testes tiveram como propósito a realização de leituras de pressão nas faces externas do modelo, para os quais não são requeridos o uso de materiais transparentes, além de facilitar a confecção do modelo. A maquete foi composta por partes fixas e móveis, como são ilustradas na Figura 56. As partes fixas incluem as paredes externas, e a base de suporte. Já os telhados são móveis, facilitando, deste modo, a etapa de instrumentação. No modelo foram realizados pequenos furos nas áreas de abertura, de modo que,

permitiram o encaixe dos dispositivos de sombreamento. Os encaixes foram tipo macho-fêmea (Figura 57), para permitir as substituições das peças que compõem esses dispositivos de sombreamento, sem necessidade de mudar os componentes fixos do modelo. Enquanto o muro de fechamento, este elemento foi fixado diretamente à base da mesa giratória do túnel de vento.

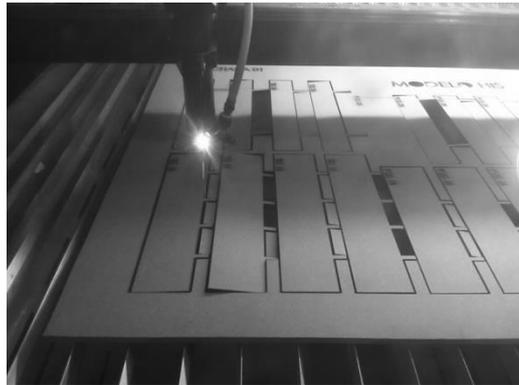


Figura 55 - Processo de corte das peças do modelo.

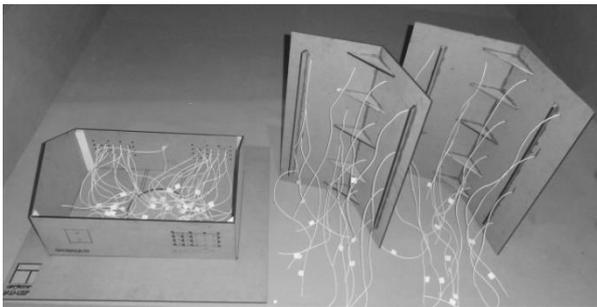


Figura 56 - Ilustração dos componentes móveis e fixos do modelo.

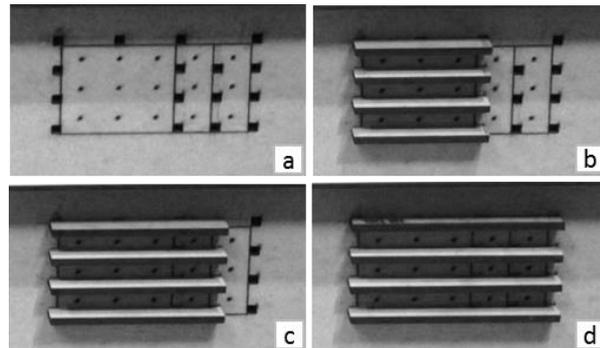


Figura 57 - Exemplificação: encaixes macho-fêmea para os dispositivos tipo veneziana para os três tamanhos de janela.

Os pontos de tomada de pressão foram localizados somente nas áreas de janela do modelo, uma vez que a ventilação no interior se faz por meio destas aberturas, a distribuição destes pontos para os três tamanhos de janela consideradas são apresentada na Figura 58. O objetivo de localizar vários pontos de tomada de pressão em cada janela foi observar as possíveis variações do C_p em diferentes pontos da mesma. Neste sentido, os pontos de tomada de pressão foram organizados da seguinte forma: para as janelas menores (1,00 x 1,20 m) foram dispostos 9 pontos de tomadas de pressão, para as janelas intermediárias (1,00 x

1,60 m) 12 pontos e para as janelas maiores (1,00 x 2,00 m) 15 pontos. Para os três tamanhos de janelas, a localização dos pontos foram dispostos em 3 eixos (superior, intermediário e inferior). Assim, o número total de tomadas de pressão entorno do modelo foram 50 pontos para os casos com janelas maiores, 41 para os casos com janelas intermediárias, e 32 para os casos com janelas menores. A enumeração e a altura concedida para cada ponto de tomada de pressão é apresentada na Figura 59.

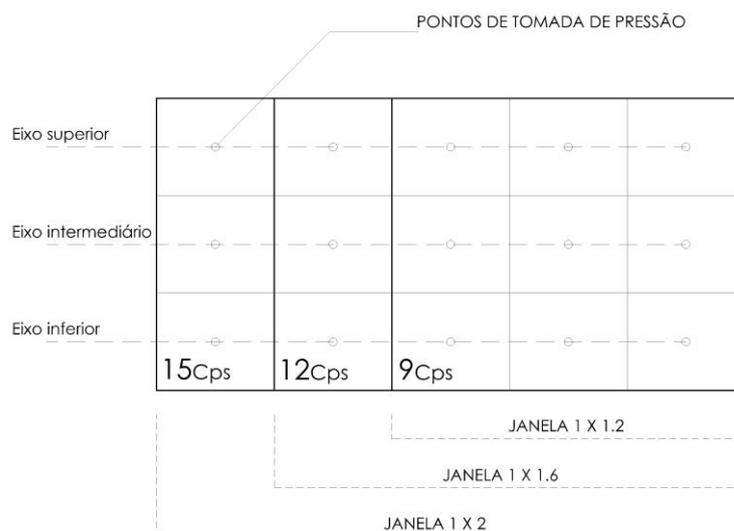


Figura 58 - Distribuição dos pontos de tomada de pressão para os três tamanhos de janelas.

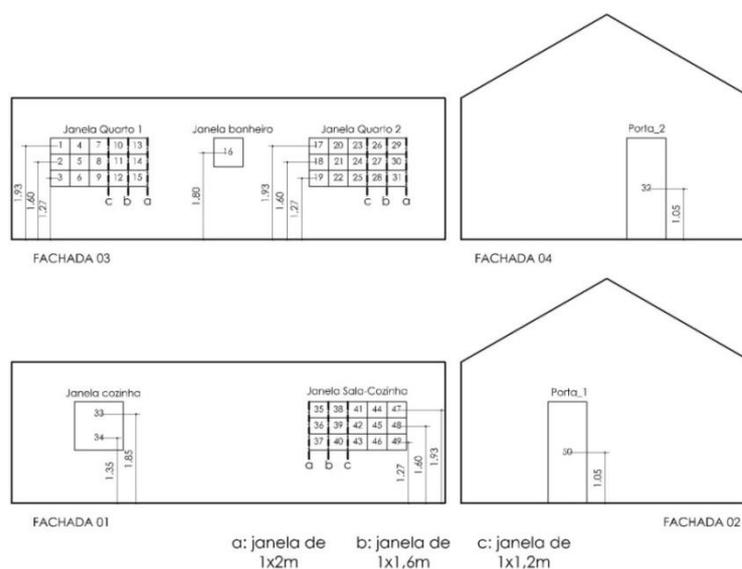


Figura 59 - Denominação de janelas e enumeração para cada ponto de tomada de pressão e a altura concedida para cada ponto.

3.3.1.3. Período de ensaios

A duração do processo de ensaios no túnel de vento de CLA do IPT foram quatro dias. As atividades englobadas neste período são descritas na sequencia.

- Modelagem da CLA no Túnel de Vento do IPT

A modelagem da CLA foi realizada previamente aos ensaios pela equipe técnica do IPT. Foi utilizado o método passivo para a simulação da CLA, seu perfil foi criado baseado no arranjo de Counihan constituído por elementos de rugosidade, (blocos de madeira dispostos ao longo do túnel de vento), geradores de vorticidade elíptico (*spires*) e a barreira (placa horizontal em madeira situada no solo do túnel em sentido transversal no início do túnel de vento). As medições das velocidades do vento foram realizadas com o tubo de *Pitot*. Os dados medidos do perfil de velocidade correspondentes à CLA criada para os ensaios são apresentados no seguinte gráfico. Os valores plotados no gráfico foram normalizados pelos valores de referência, tanto para a velocidade (13,62 m/s) quanto para a altura (0,32 m).

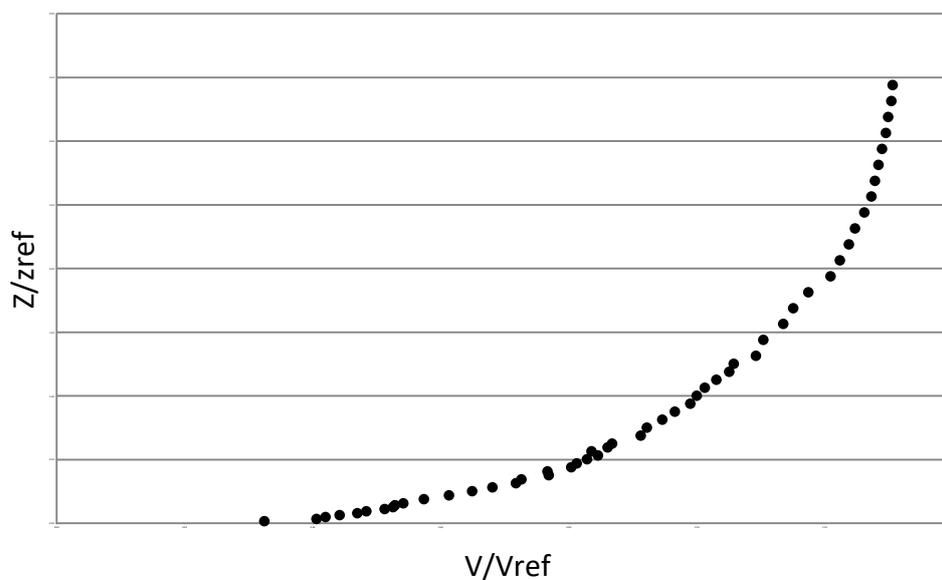


Gráfico 1 - Perfil de velocidade correspondentes à CLA na escala do modelo.

Foi utilizada uma lei potencial para caracterizar o perfil de velocidades médias. A equação utilizada para o cálculo da CLA foi a seguinte:

$$V = V_{\text{ref}} \left(\frac{Z}{Z_{\text{ref}}} \right)^{\alpha} \text{ Equação 11}$$

Onde: V: velocidade média do vento em certa altura h (m/s); Vref: velocidade do vento medida na altura de referência (m/s); Z: altura da edificação que se deseja avaliar a

velocidade do vento (m); Z_{ref} : altura de referência da velocidade do vento; e α : coeficiente de rugosidade do terreno (entorno).

Fazendo a seguinte transformação matemática temos a seguinte equação.

$$\text{Log} \left(\frac{V}{V_g} \right) = \alpha \text{Log} \left(\frac{Z}{Z_g} \right) \text{Equação 12}$$

Portanto, foi realizada a mudança dos eixos para uma progressão logarítmica, e posteriormente feita uma análise, ajustando uma equação linear da seguinte maneira.

$$Y = a + bx \text{ Equação 13}$$

Obtendo desta forma o seguinte gráfico, onde b corresponde ao valor do coeficiente de rugosidade do terreno (α) da CLA utilizada nos ensaios.

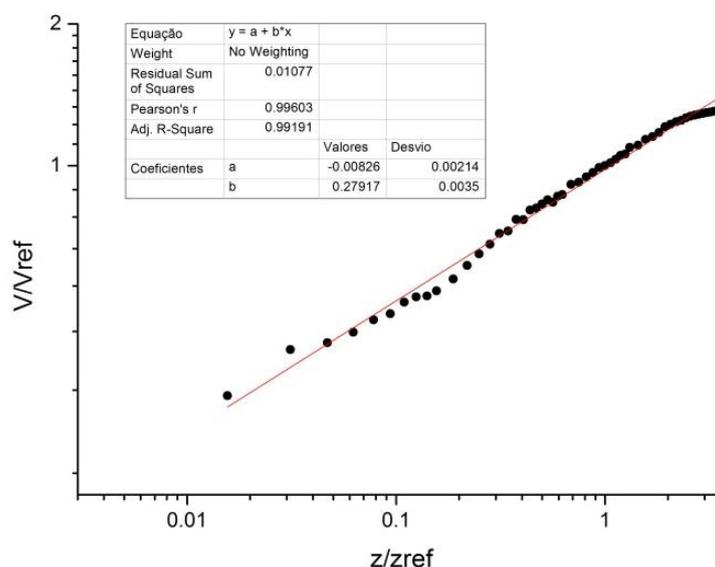


Gráfico 2 - Representação di-log do perfil da CLA

Desta forma, as características de rugosidade medidas corresponde a um terreno suburbano, categoria III de acordo com a norma NBR 6123 sobre Forças Devidas ao Vento em Edificações (ABNT, 1988). Com um valor $\alpha = 0,28$, e um desvio padrão de $\pm 0,0035$.

- Montagem do Modelo

A montagem do modelo foi realizada nas seguintes etapas: (1) Foram colados os tubos plásticos (tubo plástico de 1mm de diâmetro e 0,4 mm de parede) nos furos do modelo outorgando para cada furo uma denominação de acordo com a localização de cada ponto de tomada de pressão em torno ao modelo (Figura 59) (2) Posteriormente, os tubos plásticos foram conectados ao escâner de pressão de vários canais para realizar aferições simultâneas das pressões externas no modelo. O escâner de pressão utilizado foi *Pressure Systems modelo 16TC/DTC*. (3) A continuação foi realizada a fixação do modelo à base da mesa giratória. Por último foi realizada a vedação das bordas do modelo com fita Silver Tape.

- Ensaio

Após da fixação do modelo foi começado os ensaios propriamente ditos. As leituras de pressão foram realizadas de 0° a 360°, em intervalos de 15°. No total, foram realizados 24 ensaios; correspondentes aos oito modelos da Figura 60 por cada um dos tamanhos de janela.

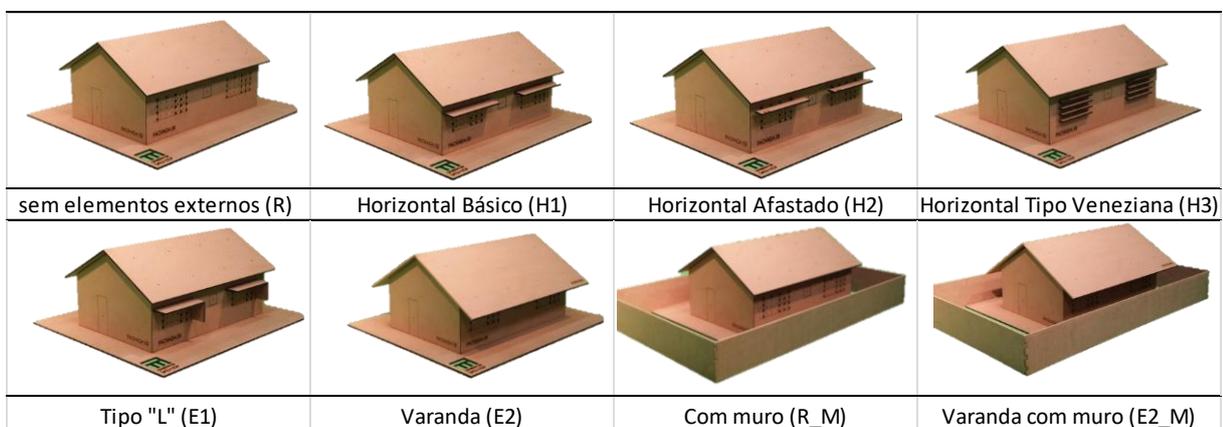


Figura 60 - Fotos das combinações testadas no túnel de vento de CLA do IPT de São Paulo (representação para um tamanho de janela).

3.3.1.4 Cálculo dos coeficientes de pressão

As medições das pressões de cada ponto de tomada de pressão para cada caso testado foram inseridas em uma planilha de cálculo disponibilizado pelos técnicos do túnel de vento de CLA do IPT. Para o cálculo de C_p a altura de referência para a velocidade do vento usada foi 0,31m, que

corresponde altura da cumeeira do modelo reduzido. Por último os valores de C_p utilizados para as simulações correspondem ao valor médio para cada ângulo de incidência do vento em cada ponto de tomada de pressão.

3.3.2. Fase 2- Simulações computacionais

Esta fase é apresentada em três partes: (1) descrição do programa *EnergyPlus*; (2) modelagem do edifício; (3) modelagem da ventilação natural.

3.3.2.1. Descrição do programa *EnergyPlus*

O *EnergyPlus* (EP) é um programa computacional, desenvolvido pelo Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE), em colaboração com o Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL), instituições acadêmicas, e o setor privado. Este programa é resultado da fusão dos programas DOE-2 e BLAST ferramentas de simulação para o cálculo de cargas energéticas desenvolvidas entre a década de 70 e 80, com o objetivo de criar uma ferramenta confiável que permitisse tanto simulações do desempenho térmico quanto a previsão do consumo energético das edificações e seus sistemas de climatização (EERE, 2012). Uma das características de destaque do EP é seu acesso livre e sua validação pela norma ASHRAE-140 (SPITLER; XIAO; REES, 2002; ASHRAE Standard 140, 2004).

Esta plataforma de simulação energética usa os conceitos fundamentais de balanço energético aplicados ao modelo de edifício. O EP possui capacidade de cálculo de trocas térmicas, índice de iluminação, consumo energético, e índices de conforto térmico, entre outros. As simulações são feitas a partir das descrições inseridas sobre a composição física do edifício, e características dos sistemas. Os dados de entrada são agrupados em vários módulos que interatuam juntos para calcular o consumo de energia necessário para resfriar ou aquecer um edifício usando uma variedade de sistemas e fontes de energia.

- Módulo *AirflowNetwork* (AFN)

A partir da versão 1.3.0 do EP, o modelo de cálculo do fluxo do ar, começou a ser chamado de *AirflowNetwork* para as análises por meio do modelo de rede, derivada do algoritmo de AIRNET. Este modelo foi o resultado da integração dos

programas AIRNET (desenvolvido pelo Instituto Internacional de Normalização e Tecnologia (NIST)) e COMIS (desenvolvido pelo Laboratório Nacional de Lawrence Bekeley (EERE, 2012; PEREIRA et al., 2013)).

O módulo AFN calcula o fluxo de ar através de frestas, janelas e portas entre as zonas interiores e o exterior. O módulo é dividido em duas partes: uma para ventilação natural e outra para ventilação forçada. No módulo relacionado à ventilação natural são determinados os elementos que permitem o fluxo de ar como as condições de abertura das janelas e portas e as características quantitativas da ventilação como os coeficientes de descarga e de pressão. Um dos dados de entrada mais importante no módulo AFN são os Cps externos (a escolha errônea deste parâmetro pode comprometer a confiabilidade das simulações (SORGATO, 2011)). O módulo AFN prevê duas alternativas para a inserção desse parâmetro: (1) utilização de Cps médios por fachada, calculados automaticamente pelo próprio programa, e (2) inserção manual dos Cp locais.

O cálculo automático dos Cp médios no módulo AFN do EP são realizados a partir do método analítico do modelo de Swami e Chandra (1988). As principais limitações desta alternativa de inserção de Cp esta relacionada a cálculos de Cp apenas para geometrias retangulares, e ao próprio fato de se utilizar um coeficiente médio de pressão para toda a fachada, sem levar em conta nos cálculos o uso de dispositivos de proteção solar nas aberturas ou outros elementos arquitetônicos que possam alterar o seu valor (EERE, 2012). Para a inserção manual dos Cp locais, estes podem ser obtidos de diferentes fontes primárias ou secundárias. Para Cóstola, Blocken e Hensen (2009), a obtenção de Cp por meio do uso de túnel de vento pode ser considerada como uma das fontes mais confiáveis.

3.3.2.2. Modelagem do edifício

Os componentes construtivos da habitação analisada são apresentados no Quadro 9. Eles se referem ao que é usualmente adotado nesse tipo de habitação (MARQUES, 2013). Os valores das suas propriedades termo-físicas dos componentes construtivos foram obtidos na norma NBR 15220-2 (ABNT, 2005b) e nos trabalhos de Dornelles (2008) e Marques (2013). As cargas internas e os períodos de ocupação foram considerados de acordo com os valores indicados pelo RTQ-R (INMETRO, 2012).

CARACTERÍSTICAS GERAIS		
Arquivo climático	Arquivo .epw. Fonte: Roriz (2012).	
Terreno	Subúrbio	
Casa térrea	Comprimento: 8,9m largura: 6m Altura: 4,6m	
	Pé-direito: 2,9m	
Zonas térmicas	Z1_Sala-Cozinha; Z2_Quarto1; Z3_Banheiro; Z4_Quarto2; Z5_Ático.	
Características Construtivas		
Paredes externas	argamassa (2.5 cm) + bloco de concreto furado de 14 cm + argamassa (2.5 cm)	
Paredes internas	argamassa (2.5 cm) + bloco de concreto furado de 9 cm + argamassa (2.5 cm)	
Absortância das paredes externas e internas	Cor branco gelo absortância solar = 0,30 / absortância visível = 0,27. Fonte: ABNT (2005b) e Dornelles (2008)	
Janelas	Vidro incolor, 4 mm	
Piso	brita (3cm) + concreto (8 cm) + argamassa (2.5 cm) + revestimento cerâmico (0.4 cm) (Fonte: Marques, 2013)	
Cobertura	telha cerâmica (1 cm) + laje cerâmica pré-moldada (12 cm)	
Absortância das coberturas	0,75 telha cerâmica. Fonte: ABNT (2005b)	
Parâmetros		
Área de janela em relação à parede externa do ambiente	Variáveis	12% (1 X 1,2 m; quartos e sala)
		16% (1X 1,6 m; quartos e sala)
		20% (1 X 2 m; quartos e sala)
	Fixas	7% (cozinha)
6% (banheiro)		
Vidro Cor/Espessura	Incolor/4mm	

Quadro 9 - Componentes construtivos e padrão de uso adotado

	Transmitância térmica	Capacidade térmica		
Paredes externas	2,76 W/m ² .K	266 KJ/m ² .K		
Paredes internas	2,27 W/m ² .K	206 KJ/m ² .K		
Sistema piso	3,08 W/m ² .K	281 KJ/(m ² .K)		
Sistema de cobertura	1,78 W/m ² .K	189 KJ/m ² .K		
Absortância				
Fonte: Dornelles (2008)	Solar	Visível		
Paredes externas	0,3	0,27		
Paredes internas	0,3	0,27		
Cobertura	0,75			
Cargas internas e período de ocupação				
	Sala	Quarto 1	Quarto 2	Cozinha
	6 W/m ²	5 W/m ²	5 W/m ²	6 W/m ²
Iluminação	17h-22h	7h-8h/	7h-8h/	12h-14h/
		21h-23h	21h-23h	18h-20h
Ocupação	14h-22h	22h - 08h	21h - 08h	12h-14h/
				18h-20h
Equipamentos	01h-24h		Não se aplica	
Temperatura do solo	Igual à média mensal da temperatura externa (25°C é a temperatura máxima permitida no EP)			

Quadro 9 - Componentes construtivos e padrão de uso adotado (continuação).

3.3.2.3. Modelagem da ventilação natural

A modelagem da ventilação natural foi realizada no módulo AFN do EP. Neste módulo foram caracterizadas as condições da ventilação natural desejada de acordo com o

Quadro 10. Foi utilizada para a modelagem da simulação da ventilação natural neste módulo a alternativa de inserção manual de Cp locais, os quais foram obtidos no túnel de vento de CLA. Não foram citados no

Quadro 10 os parâmetros considerados como o padrão do próprio programa EP (*default*).

MÓDULO AFN DO EP*

*Os nomes dos itens não foram alterados para melhorar o entendimento das informações inseridas neste módulo.

Simulation Control

<i>AirflowNetwork control</i>	<i>MultizoneWithoutDistribution</i>
<i>Wind Pressure Coefficient type</i>	Dado de entrada

AirflowNetwork: Multizone:Zone

<i>Zone Name</i>	Z1_Sala-cozinha; Z2_Quarto_1; Z3_Banheiro; Z4_Quarto_2; Z5_Ático
<i>Ventilation Control Mode</i>	Temperatura
<i>Ventilation Control Zone Temperature Setpoint Schedule</i>	20 °C. Fonte: INMETRO (2012).
<i>Venting Availability Schedule Name</i>	Ti > Tsetpoint; Ti > Te; horário=1 (o tempo todo).

AirflowNetwork: Multizone:Surface

<i>Surface Name</i>	Janelas	Portas Ext	Portas Int
<i>Window/Door Opening Factor, or Crack Factor</i>	1	1	1
<i>Ventilation Control Mode</i>	Temperatura	Constante	Constante
<i>Ventilation Control Zone Temperature Setpoint Schedule</i>	20°C	Sem	Sem
<i>Minimum Venting Open Factor</i>	1		
<i>Venting availability Schedule Name</i>	Ti > Tsetpoint; Ti > Te; horário= 1 (o tempo todo)	Horário= 0 (o tempo todo)	Horário= 1 (o tempo todo)

Quadro 10 - Modelagem da ventilação natural no módulo AFN.

Surface Name	Janelas	Portas Ext	Portas Int
AirflowNetwork: MultiZone: Component: DerailedOpening			
Air Mass Flow Coefficient When Opening is Closed. Fonte: INMETRO (2012).	0,001	0,001	0,001
Air Mass Flow Exponent When Opening is Closed. Fonte: INMETRO (2012).	0,65	0,65	0,65
Type of Rectangular Large Vertical Opening (LVO)	Não pivotante	Não pivotante	Não pivotante
Number of Set of Opening Factor Data	2	2	2
Opening Factor 1 ⁵	0	0	0
Discharge Coefficient for Opening Factor 1 Fonte: INMETRO (2012).	0,001	0,001	0,001
Width Factor for Opening Factor 1	0	0	0
Height Factor for Opening Factor 1	0	0	0
Opening Factor 2	1	1	1
Discharge Coefficient for Opening Factor 2 Fonte: INMETRO (2012).	0,6	0,6	0,6
Width Factor for Opening Factor 2	1	1	1
Height Factor for Opening Factor 2	1	1	1
AirflowNetwork:MultiZone:WindPressureCoefficientArray			
Wind Direction	Cada 15 graus		
AirflowNetwork:Multizone:WindPressure CoefficientValues	Valores de Cp segundo o caso simulado. Os dados foram inseridos manualmente.		

Quadro 10 - Modelagem da ventilação natural no módulo AFN (continuação).

⁵ O fator de abertura (*opening factor*) determina o grau de abertura habilitada para a ventilação natural nas janelas. O valor é dado por hora, o rango varia de 0 a 1, sendo 0 a totalidade do vão fechado e 1 aberto, quando o valor e 0 a ventilação no interior só acontece por infiltração.

3.4. Etapa 3 Pós-processamento e análise dos dados

Os impactos dos elementos externos à fachada na habitação estudada foram divididos em dois aspectos: impactos na ventilação natural (ver item 3.4.1) e impactos no desempenho térmico (ver item 3.4.2). Esses impactos foram analisados através da comparação entre os casos com e sem os elementos externos.

Desta forma, um valor positivo correspondeu ao aumento do parâmetro analisado devido ao acréscimo do elemento em questão, e um valor negativo, à sua diminuição.

3.4.1. Impacto na ventilação natural

Este impacto foi avaliado através de duas análises: (1) impacto nos valores de C_p , aferidos no túnel de vento de CLA (fase1), e (2) impacto nas taxas de renovação de ar decorrentes das simulações computacionais (fase 2). Foi incluída também a caracterização da ventilação natural para esta edificação, distinguindo-se os períodos onde é mais eficiente a ocorrência da ventilação natural, e as diferenças observadas nas taxas de renovação de ar para os distintos ambientes nas duas orientações consideradas.

3.4.2. Impacto nas temperaturas internas

As avaliações deste impacto foram conduzidas com a finalidade de se verificar as temperaturas internas dos ambientes e o seu nível de conforto térmico. Foi adotado para tal fim, o método de conforto adaptativo fornecido pela norma *ASHRAE Standard 55* (2013).

3.4.2.1. Descrição do índice de conforto adaptativo

A norma *ASHRAE Standard 55* (2013) incorporou, desde a sua versão de 2004, o método de Conforto Adaptativo desenvolvido por Dear e Brager (2002). Esta metodologia avalia o conforto térmico em edificações naturalmente ventiladas, considerando que as pessoas se adaptam às condições do clima do local. Portanto, esta norma esclarece que este método é aplicável em situações onde o

usuário tem a liberdade de se adaptar, e entre alguns dos critérios mencionados pela norma estão: ter controle da operabilidade das janelas, da vestimenta e estar entre uma faixa de taxa metabólica dentre 1,0 e 1,3 met.

Esta metodologia considera duas faixas de aceitação, correspondentes a 80 e 90% das pessoas satisfeitas. Para este trabalho, utilizou-se a faixa de 90%. O cálculo da temperatura de conforto diária (para cada dia do ano) é feito através das equações 14 e 15. A Figura 61 apresenta o método de forma gráfica.

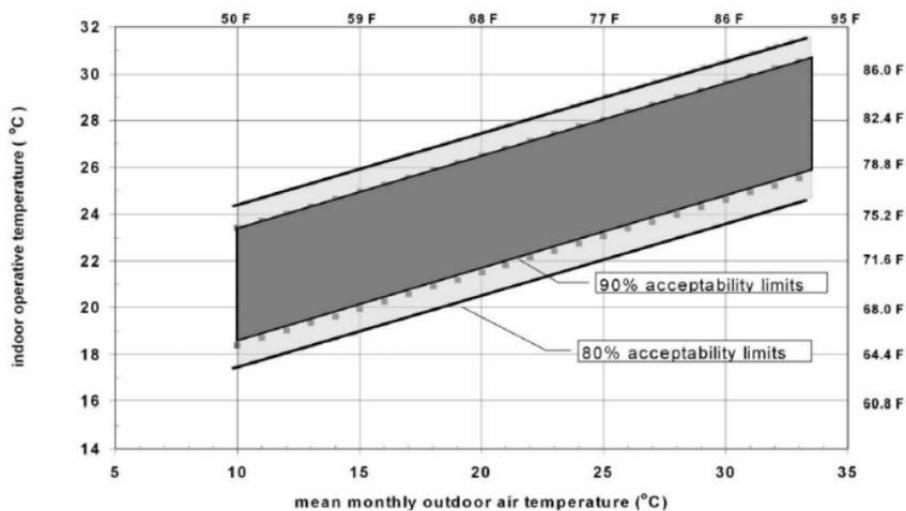


Figura 61 - Faixa de conforto proposta pela norma ASHRAE Standard 55 (2013): Variação de temperatura operativa aceitável em ambientes naturalmente ventilados. Fonte: ASHRAE Standard 55 (2013).

Limite superior 90% das pessoas satisfeitas (°C): $0.31 \cdot T_{\text{Med}} + 20,3$ Equação 14

Limite inferior 90% das pessoas satisfeitas (°C): $0.31 \cdot T_{\text{Med}} + 15,3$ Equação 15

Onde: T_{Med} = Média da temperatura do ar exterior (entre 7 e 30 dias anteriores ao dia em questão) Neste trabalho, utilizou-se 15 dias.

A análise para quantificar o nível de desconforto para um ambiente é feita através da obtenção dos grau-hora (°Ch) de frio e de calor para o período de um ano. Este método é definido como a somatória das diferenças horárias entre a temperatura operativa de um determinado ambiente e os limites superior ou inferior calculados para cada dia do ano. A temperatura operativa é definida como a média aritmética entre a temperatura interna do ar e a temperatura radiante

média⁶. Quando a temperatura operativa ultrapassa o limite superior, denomina-se graus-hora de calor, indicando o desconforto por calor no ambiente. Do mesmo modo, quando ela é menor que o limite inferior, tem-se os graus-hora por frio, indicando a necessidade de aquecimento do ambiente.

3.4.3. Elaboração de recursos gráficos

Os dados coletados nas fases 1 e 2 da etapa 2 foram inseridos em planilhas de Excel® (MICROSOFT, 2010) padronizadas segundo as anteriores análises. Estas planilhas foram compostas por fórmulas e interligações entre arquivos previamente configuradas para a geração de gráficos, figuras e tabelas de forma automática, otimizando o processo de elaboração destes materiais.

⁶ Temperatura radiante média: Temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual a troca de calor por radiação é igual ao ambiente real não uniforme.

4. RESULTADOS

Os resultados são organizados em cinco seções. As quatro primeiras seções foram redigidas de forma que pudessem ser lidas de forma independente entre si, configurando um conjunto de ideias articuladas, para posteriormente serem transformadas em artigos científicos. Com isso, algumas informações são repetidas entre seções, pois, são requeridas para melhorar a compreensão das discussões ali levantadas. Todo o material gráfico deste capítulo estão acessíveis em <http://www.iau.usp.br/laboratorios/lca/anexos/graficoshector>

Seção 4.1: apresenta os coeficientes de pressão medidos no túnel de vento e faz uma análise comparativa entre eles, identificando a influência de cada elemento estudado (proteções solares e muro) nesse parâmetro.

Seção 4.2: apresenta o impacto das varandas na ventilação natural, temperaturas interiores e conforto térmico.

Seção 4.3: faz um estudo do impacto no desempenho térmico da habitação estudada pela presença das proteções horizontais e em L, com relação à ventilação natural, temperaturas internas do ar e conforto térmico.

Seção 4.4: apresenta o impacto do muro na ventilação natural e nas temperaturas interiores da habitação.

Seção 4.5. Considerações finais: faz uma síntese de todos os resultados.

4.1. Análise comparativa dos coeficientes de pressão

4.1.1. Coeficientes de pressão nas janelas sem elementos externos

Os coeficientes de pressão dos casos sem elementos externos (R), obtidos para as janelas dos ambientes de maior permanência (sala-cozinha e quartos), são apresentados na Figura 62, em uma escala de cores (cada cor representa um intervalo de valor de C_p) para cada ângulo de incidência do vento. Tem-se todos os pontos aferidos na janela intermediária (1x1,6m). As janelas de outras dimensões apresentam resultados semelhantes. Todas as janelas possuem a mesma altura de peitoril e assumem as mesmas dimensões quando comparadas entre si, sendo, portanto, simétricas com relação aos efeitos do vento.

Para a incidência do vento de 0° (perpendicular às janelas dos quartos 1 e 2), quanto para incidências em torno desse valor, à direita (15° em diante) e à esquerda (345° e valores menores), tem-se sobrepressão nas janelas dos quartos 1 e 2 e sucção na janela da sala-cozinha. A partir da incidência de 60° , passa a haver também sucção na janela do quarto 2. Para a janela do quarto 1, a sucção passa a ocorrer com a incidência de 75° . Já a janela da sala-cozinha permanece na zona de sucção, mas com valores de C_p cada vez mais baixos, até encontrar-se a barlavento (sobrepressão), com a incidência de 135° . As janelas dos quartos 1 e 2 permanecem sujeitas à sucção, enquanto a janela da sala-cozinha passa novamente à sucção quanto a incidência do vento é igual a 255° . Finalmente, as janelas dos quartos 2 e 1 passam novamente a sofrer sobrepressão com as incidências de 300° (quarto 2) e 315° (quarto 1).

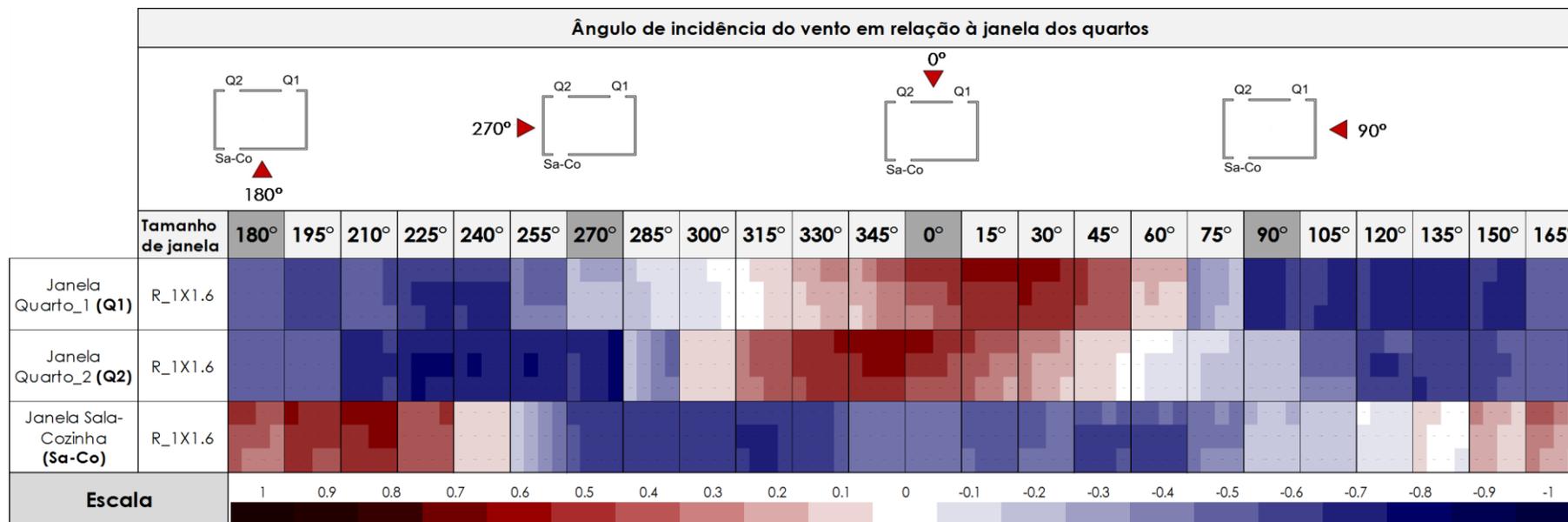


Figura 62 - Coeficientes de pressão para todos os pontos medidos na janela intermediária (1x1,6m), para a sala-cozinha e os quartos 1 e 2, sem elementos externos à fachada.

4.1.2. Impacto dos dispositivos de sombreamento horizontais nos coeficientes de pressão

O acréscimo de qualquer dispositivo horizontal (básico, afastado ou veneziana), não altera os ângulos de incidência do vento nos quais a janela encontra-se a barlavento ou a sotavento (Figura 63, comparação com o caso sem elementos externos). No entanto, nota-se que, nos ângulos a barlavento, pode ocorrer tanto o aumento quanto a redução da sobrepressão, e nos ângulos a sotavento, o mesmo acontece com a sucção. Na Figura 64 esses impactos são apresentados. Vê-se que para as proteções horizontais básica e afastada, essas regiões são muito similares. Ocorre, na maior parte dos ângulos, a redução da sobrepressão ou da sucção, sendo o efeito oposto identificado pontualmente nos ângulos de 75°, 165°, 270° a 300°, 180° e 255° (estes dois últimos, somente para o H2), para o aumento da sucção, e no ângulo de 345°, para o aumento da sobrepressão. Já a veneziana apresenta a predominância de aumento, tanto da sobrepressão quanto da sucção, com a sua redução apenas quando a incidência do vento é igual a 45°, 60°, 90°, 195° (redução da sucção) e 315° 330° (redução da sobrepressão).

O elemento que apresenta maior diferença de Cps (Figura 64), em média, é o básico, enquanto o afastado e a veneziana têm valores muito próximos entre si. Para o dispositivo horizontal básico, as faixas de ângulos com redução da sucção são as que possuem as maiores diferenças, chegando-se a 0,16 correspondendo à diferença percentual relativa⁷ (Dpr) de (27,6%). Nos dispositivos horizontais afastado e veneziana, o pico é na faixa de aumento da sucção, sendo igual a 0,09 (Dpr de 23,1%).

⁷ A diferença percentual relativa é dada por ângulo de incidência do vento, em relação ao valor médio do caso sem elemento externo nesse ponto.

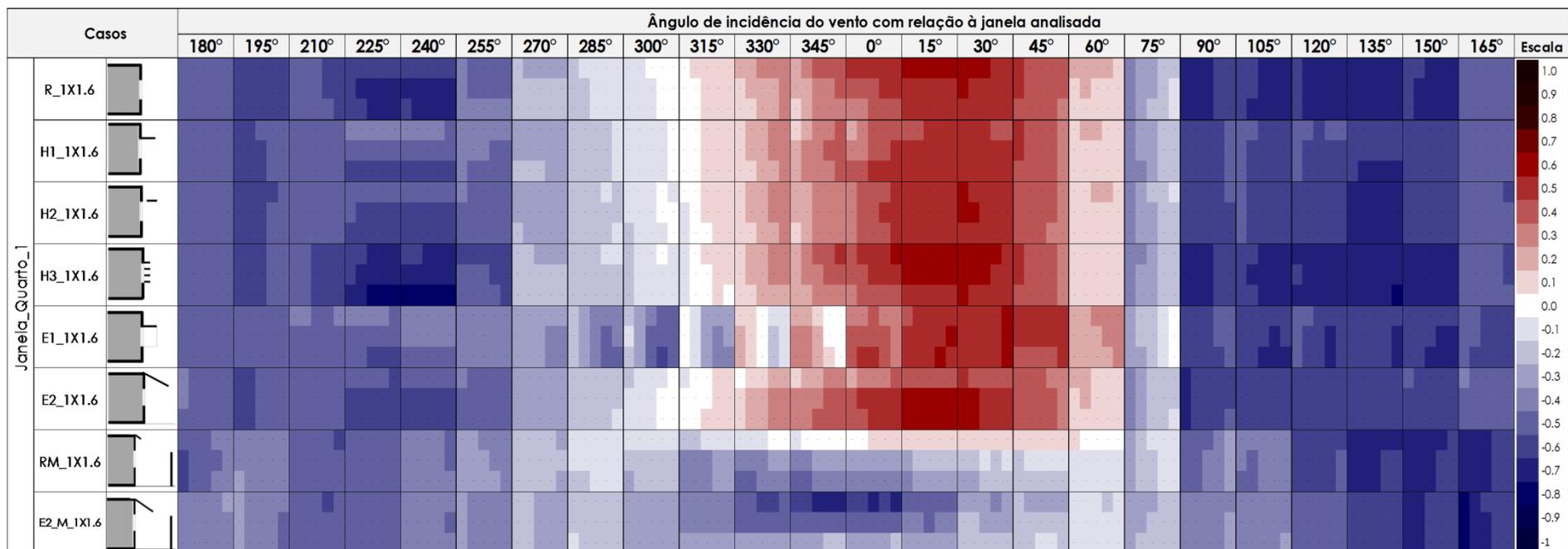


Figura 63 - Coeficientes de pressão para todos os pontos medidos na janela intermediária (1x1,6m), para todos os casos estudados.

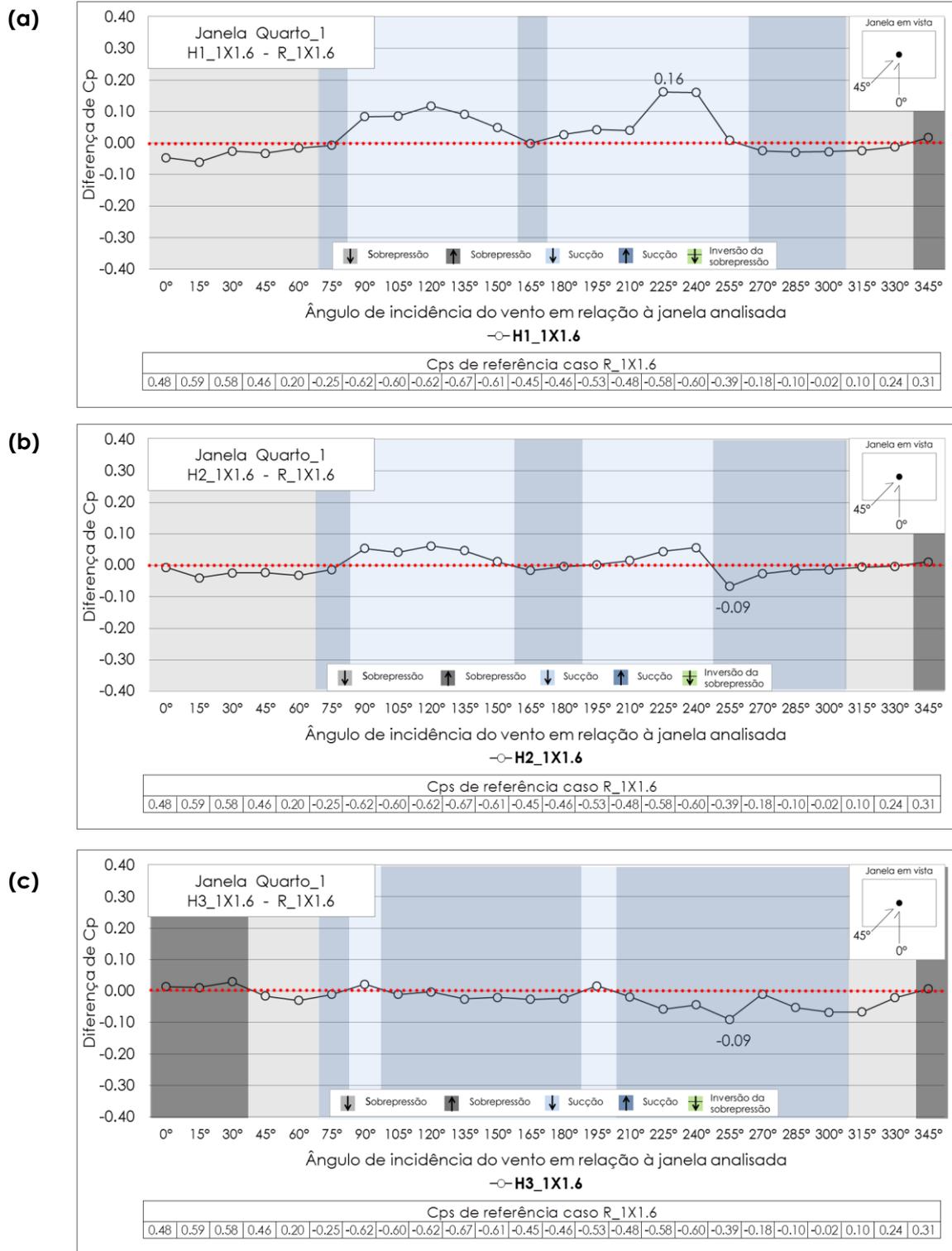


Figura 64 - Diferença entre os Cps por ângulo de incidência do vento do quarto 1 para os casos **(a)** H1_1X1,6 - R_1X1,6; **(b)** H2_1X1,6 - R_1X1,6; **(c)** H3_1X1,6 - R_1X1,6.

4.1.3. Impacto do dispositivo de sombreamento tipo "L" nos coeficientes de pressão

Na Figura 65 é possível visualizar que, na faixa de ângulos de 315 a 345°, a janela com a proteção em L (E1) apresenta pontos com sucção, embora isso não ocorra para o caso sem esse elemento. O vento incide, nessa situação, na aba vertical dessa proteção, o que causa esse fenômeno. Na Figura 65, nessa mesma faixa (em verde) é identificada a inversão da sobrepressão, fenômeno consistente na inversão do sinal do Cp de positivo a negativo. Verifica-se que o maior efeito do acréscimo do dispositivo em L (E1) é a redução, tanto da sobrepressão quanto da sucção, tendo-se, no entanto variadas faixas de ângulos nos quais é observado o oposto (45-60°, aumento da sobrepressão e 105°, 165° a 180° e 270° a 300°, aumento da sucção). As diferenças nos Cps são maiores que as das proteções horizontais; diferença máxima de 0,21 (Dpr de 35%) na redução da sucção; de 0,34 (Dpr de 1700%, pois o valor do Cp do caso sem proteção é muito baixo, -0,02) no aumento da sucção e de 0,33 (Dpr de 330%), na redução da sobrepressão com inversão de sinal do Cp.

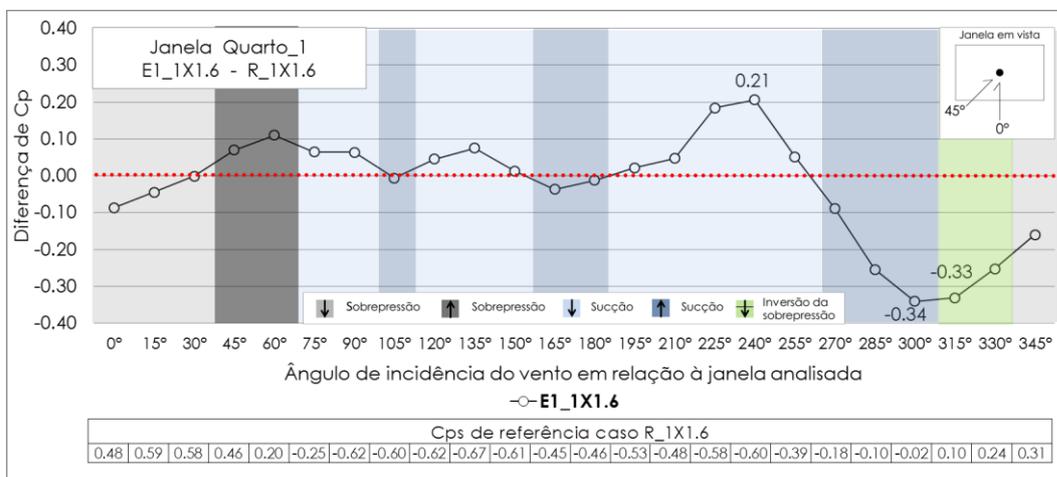


Figura 65 - Diferença entre os Cps por ângulo de incidência do vento do quarto 1 para os casos E1_1X1,6 - R_1X1,6.

4.1.4. Impacto da varanda nos coeficientes de pressão

Os ângulos de incidência do vento nos quais a janela encontra-se a barlavento ou a sotavento são os mesmos para os casos com (E2) e sem (R) varanda (Figura 63, comparação entre o caso com e sem varanda). Dentre todos

os elementos de proteção (horizontais, varanda e em L), é este o que apresenta maior quantidade de ângulos com redução tanto da sobrepressão quanto da sucção (Figura 66). O aumento da sobrepressão ocorre somente no ângulo de 345°, e o da sucção, entre 255 e 300°. Também é a varanda a que apresenta as menores diferenças no C_p , assumindo o máximo de 0,10 (Dpr de 15%) de redução da sucção.

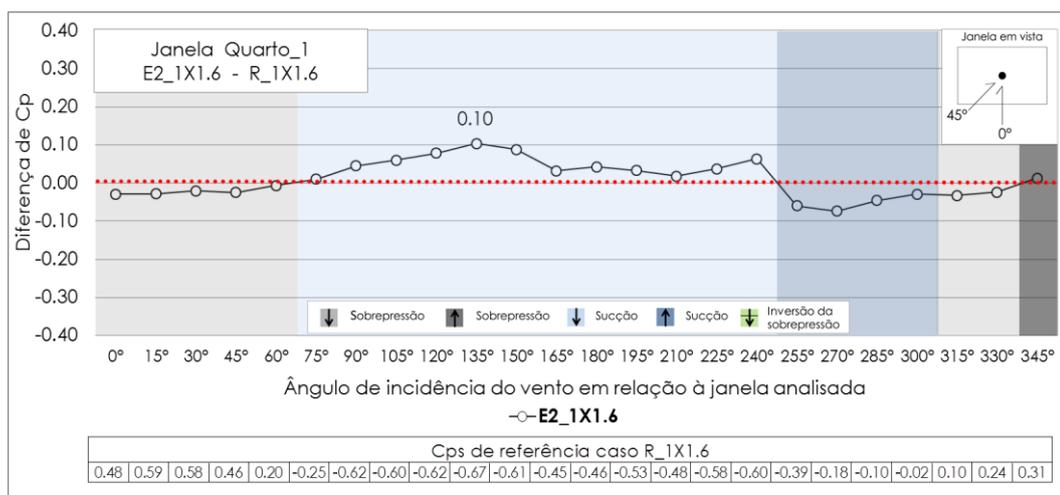


Figura 66 - Diferença entre os Cps por ângulo de incidência do vento do quarto 1 para os casos E2_1X1,6 - R_1X1,6.

4.1.5. Impacto do muro nos coeficientes de pressão

Esse é o elemento que apresentou o maior impacto nos Cps (conforme Figura 63 sobre as comparações dos casos com (RM) e sem (R) muro, e dos casos com varanda (E2) e varanda mais muro (E2_M)).

Para todas as incidências do vento nas quais originalmente ocorre sobrepressão, o muro alterou esse fenômeno, causando sucção em todos os pontos da janela (exceto no eixo superior, do caso com muro (RM), Figura 63). Nos ângulos onde já ocorria a sucção, essa é reduzida (efeito mais frequente) ou aumentada (ângulos de 150 a 165°, 300° e 270°, este último, somente para o caso com varanda (E2_M)). Isso faz com que, nos casos com muro (RM), haja apenas sucção na janela, para todas as direções do vento. As diferenças nos Cps também assumem os maiores valores encontrados dentre os casos desta pesquisa (Figura 67). Os casos com muro (RM) e varanda mais muro (E2_M) apresentam valores muito similares entre si, sendo as diferenças mais elevadas para a habitação com varanda mais

muro (E2_M). Nesse caso, na redução da sobrepressão com alteração do sinal do Cp (efeito de inversão de sobrepressão), tem-se a diferença máxima de 0,92 (Dpr de 161%), na redução da sucção 0,22 (Dpr de 38%) e no aumento da sucção 0,22, (Dpr de 52%).

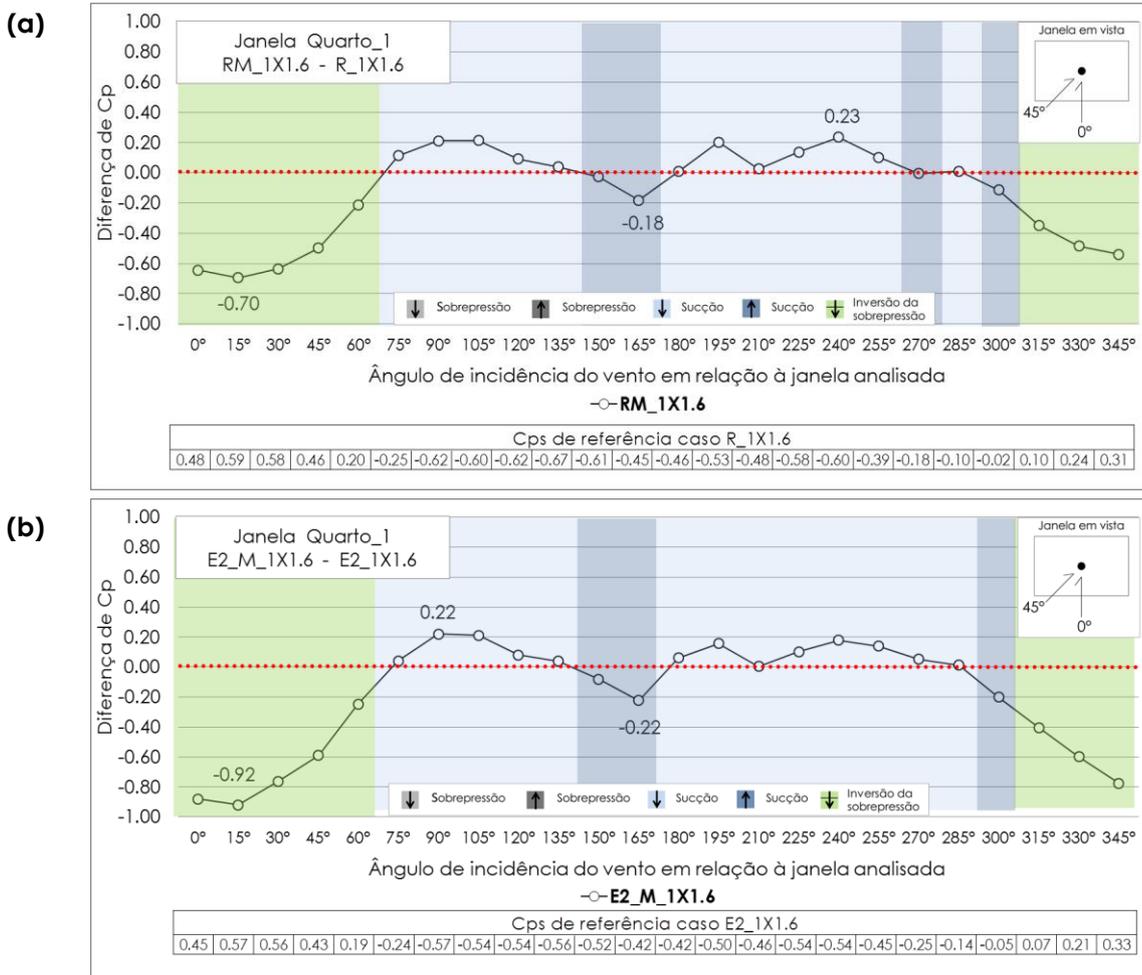


Figura 67 - Diferença entre os Cps por ângulo de incidência do vento do quarto 1 para os casos **(a)** RM_1X1,6 - R_1X1,6; **(b)** E2_M_1X1,6 – E2_1X1,6.

4.1.6. Diferenças nos coeficientes de pressão entre janelas opostas

Para se inferir o impacto que as diferenças nos Cps pontuadas na seção anterior assumem na ventilação cruzada devido à ação do vento, a Figura 68 apresenta as diferenças nos valores de Cp entre janelas opostas, para todos os ângulos de incidência e todos os casos ensaiados, a saber:

Diferencial Q1 = Cp da janela do quarto 1 menos o Cp da sala-cozinha , em módulo

Diferencial Q2= Cp da janela do quarto 2 menos o Cp da sala-cozinha, em módulo

Os Cps para cada janela são os valores médios entre todos os pontos aferidos. Como não houve variação significativa entre os três tamanhos de janela, são apresentados somente os dados referentes à de dimensões 1x1,6m.

As menores diferenças entre os Cps de entrada e saída, tanto para o diferencial Q1 quanto para o Q2, é para os casos com muro (RM e E2_M), que se destacam dos demais. Esse foi o elemento que apresentou o maior impacto nos Cps (ver seção 4.1.5.), resultando na habitação com sucção em todas as fachadas, independente do ângulo de incidência. A situação que mais influencia na redução da ventilação cruzada é a inclusão conjunta da varanda mais muro (E2_M), seguida do muro, apenas.

O segundo elemento de maior impacto, que supera o impacto do muro para certos ângulos é a proteção em L (E1). Com a adição dessa proteção também há ângulos nos quais a ventilação cruzada é intensificada, embora a diferença para o caso sem esse elemento (R) seja muito pequena. Ou seja, a proteção em L apresenta um impacto variável, ora intensificando a ventilação cruzada e ora reduzindo-a, embora este último efeito assumam valores muito mais significativos. Essas observações são válidas tanto para o diferencial Q1 quanto para o Q2.

As proteções horizontais (H1, H2, e H3) e a varanda (E2) são os elementos com menor influência, assumindo diferenças entre os Cps de entrada e saída muito próximas às dos casos sem elemento algum (R). Para as proteções horizontal básica (H1) e afastada (H2) ocorre sempre a redução do fluxo de ventilação. Já para as proteções tipo veneziana (H3), em grande parte dos ângulos de incidência, o fluxo de ventilação é ligeiramente aumentado em relação ao caso sem elementos (R). Para esta proteção o aumento no diferencial Q1 ocorreu nos ângulos 0° até 180°; de 105° até 180° e de 255° até 270°; para o diferencial Q2 as faixas foram de 285° até 15° e 105° até 195°.

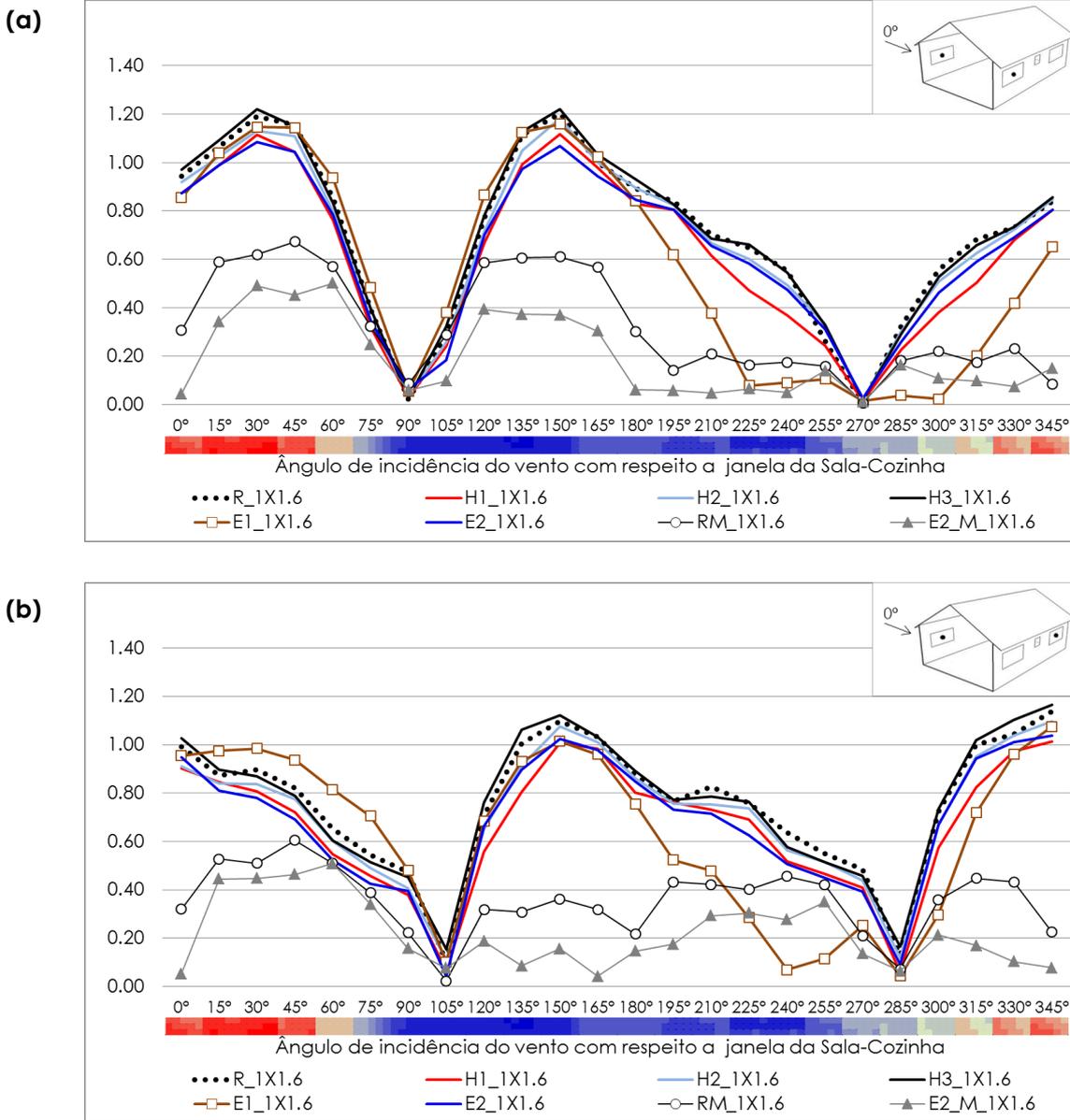


Figura 68 - Diferença entre Cps de janelas opostas para todos os casos com janelas de tamanho intermediário (1x1,6m):**(a)** quarto 1 e sala-cozinha (Diferencial Q1), **(b)** quarto 2 e sala-cozinha (Diferencial Q2).

4.2. Influência da varanda

O impacto da inclusão da varanda na edificação estudada é avaliado com relação a três aspectos: (1) Impacto nos coeficientes de pressão (item 4.2.1); (2) impacto no fluxo de ar (item 4.2.2); e (3) impacto nas temperaturas interiores/conforto (item 4.2.3). Os casos a que se referem os resultados desta seção são relacionados no Quadro 11.

Sem varanda	Com varandas
R_1X2_N1	E2_1X2_N1
R_1X2_N2	E2_1X2_N2
R_1X1,6_N1	E2_1X1,6_N1
R_1X1,6_N2	E2_1X1,6_N2
R_1X1,2_N1	E2_1X1,2_N1
R_1X1,2_N2	E2_1X1,2_N2

Quadro 11 - Casos de estudo relacionados com o impacto da varanda

4.2.1. Impacto nos coeficientes de pressão

A Figura 69 ilustra a diferença entre os Cps dos casos com (E2) e sem (R) varanda por ângulo de incidência do vento. Foi escolhida para ilustrar este impacto a janela do quarto 1, com dimensão de janela intermediária (1x1,6m), pois, os comportamentos observados para os demais ambientes e tamanhos de janela foram similares. A diferença entre os Cps é decorrente da média entre os Cps obtidos a partir do túnel de vento para cada ponto da área de janela.

Foram identificados quatro tipos de comportamento: (1) diminuição da sobrepressão; (2) aumento da sobrepressão; (3) diminuição da sucção; e (4) aumento da sucção. Os comportamentos predominantes foram a redução tanto da sobrepressão quanto da sucção. A maior diferença registrada foi de 0,10 para o ângulo de incidência do vento de 135°, localizada na faixa de diminuição da sucção, que corresponde à diferença porcentual relativa (Dpr) de 15% nesse ponto.

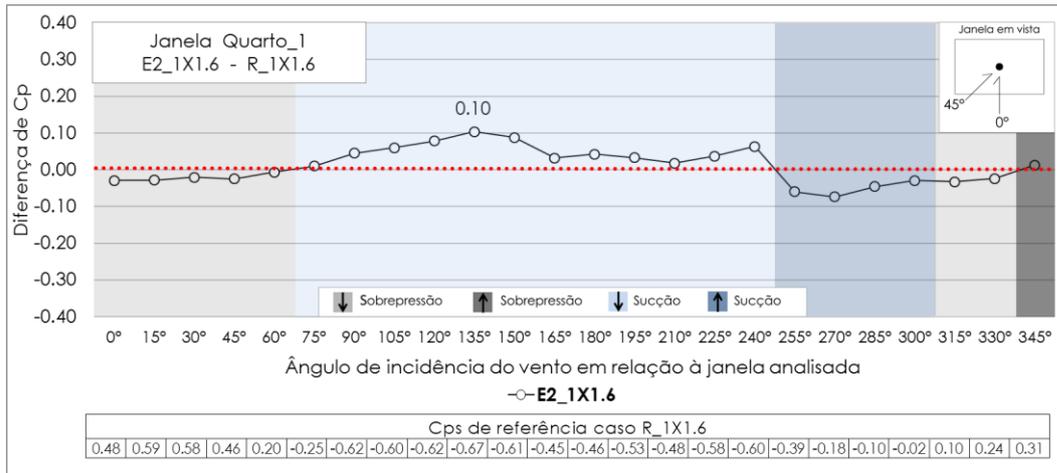


Figura 69 - Diferença entre os Cps para os caso com (E2_1X1,6) e sem (R_1X1,6) varanda por ângulo de incidência do vento do quarto 1.

4.2.2. Impacto no fluxo de ar

4.2.2.1 Períodos de ventilação

Nas simulações computacionais realizadas no EP, para que as janelas dos ambientes de maior permanência (sala-cozinha e quartos) fossem abertas tiveram que ser satisfeitas simultaneamente duas condições: (1) temperatura do ar interna maior que a externa, e (2) temperatura do ar interna maior que 20°C. Essas condições foram permitidas durante as 24 horas do dia. Com isso, foi possível observar os horários de abertura de janela mais eficientes.

Esse período de abertura de janela propício para que aconteça a ventilação, foi o mesmo para todos os meses do ano, e para todos os casos estudados com e sem varanda. Assim, o horário indicado pelas simulações foi desde o final do dia até o início da manhã (das 16 às 8hrs aproximadamente), conforme indicado na Figura 70 referente ao quarto 1, do caso com varanda, tamanho de janela de 1x1,6m e orientação N2 (Leste-Oeste). Nesse gráfico, verifica-se que, no fim do dia, existe uma diminuição da temperatura do ar externa, de modo que ela se torna menor que a interior, permitindo que haja ventilação. Como a temperatura de 20°C nunca é atingida, de noite, as janelas nunca são fechadas. No período diurno, a temperatura externa é superior à interna, fazendo com que as janelas se fechem nesse período.

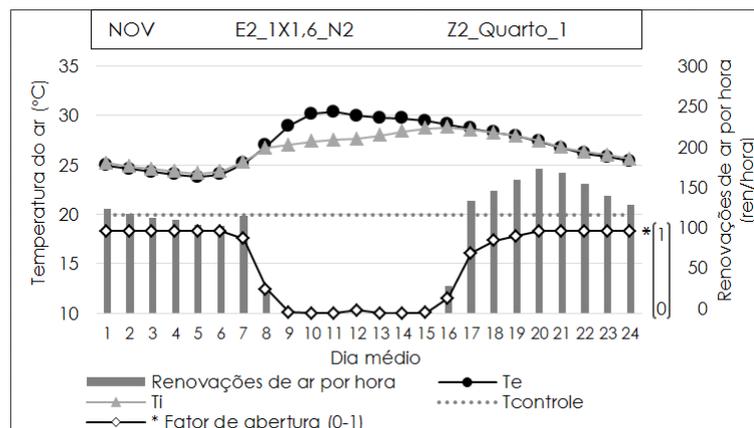


Figura 70 - Valores médios horários para as temperaturas do ar externa e interna, taxa de renovação de ar, e fator de abertura da janela do quarto 1 em novembro, do caso E2_1X1,6_N2.

4.2.2.2 Diferenças na taxa de renovação de ar

As Figuras 71 e 72 apresentam as diferenças percentuais horárias das taxas de renovação de ar entre os dos casos com (E2) e sem (R) varanda para as orientações Norte-Sul (N1) e Leste-Oeste (N2), respectivamente. Somente são apresentados os resultados para a janela intermediária (1x1,6m), já que impactos semelhantes foram observados quando este parâmetro foi variado.

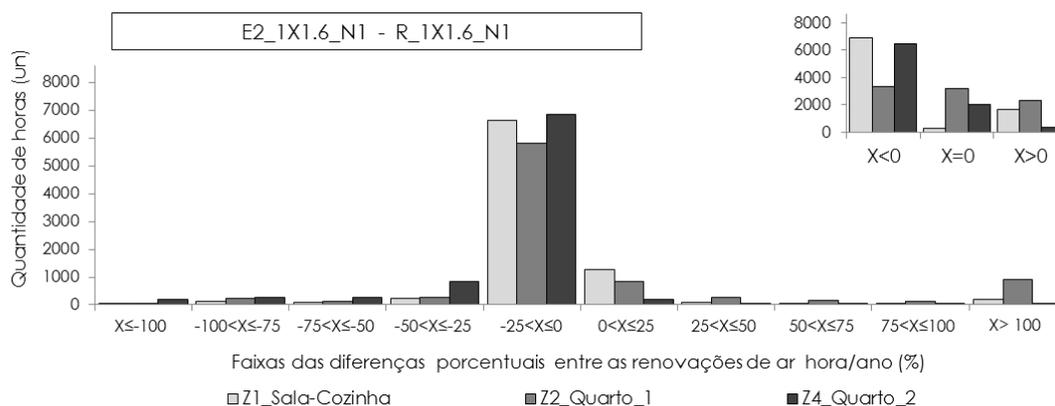


Figura 71 - Faixas de diferença percentual das taxas de renovação de ar dos casos com (E2_1X1,6_N1) e sem (R_1X1,6_N1) varanda.

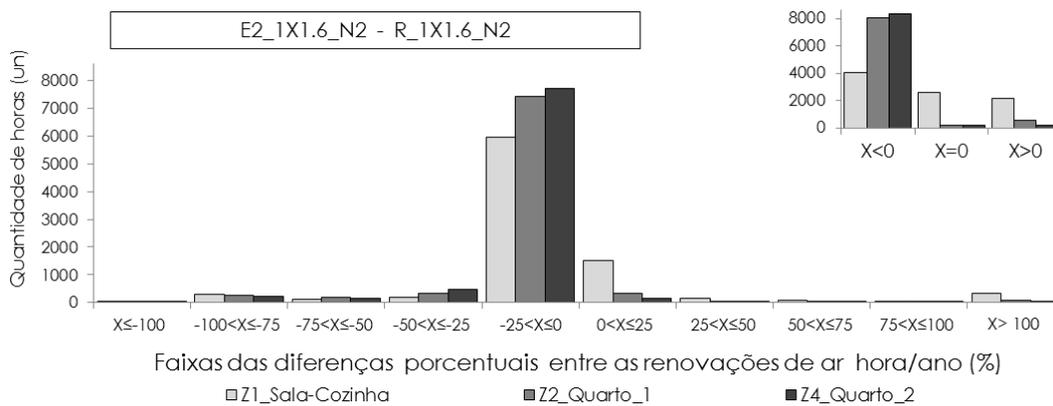


Figura 72 - Faixas de diferença percentual das taxas de renovação de ar dos casos com (E2_1X1,6_N2) e sem (R_1X1,6_N2) varanda.

A inclusão das varandas resultou em uma diminuição da taxa de renovação de ar para a maior parte das horas do ano em até 25%, para todos os ambientes e em ambas as orientações. Essa redução do fluxo de ar vai de encontro com o já apresentado na Figura 69 (ver item 4.2.1, sobre o impacto nos Cps) que evidencia o efeito predominante da diminuição tanto da sobrepressão, quanto da sucção pela inclusão da varanda. Nas Figuras 71 e 72, foram observadas também diferenças positivas embora em proporção muito inferior, indicando um maior fluxo de ar para os casos com varanda. Isso possivelmente ocorre como consequência da incidência do vento para alguns ângulos pontuais nos quais existem um aumento do efeito de sucção e/ou sobrepressão (ver item 4.2.1).

Esse efeito predominante de redução do fluxo de ar se dá em relação às taxas de renovação obtidas para a habitação no clima em questão, que podem ser consideradas altas, conforme pode ser visto nas Figura 73, referente aos casos sem varanda (R), orientação N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste) com tamanho de janela de 1x1,6m. A média das máximas diárias das taxa de renovação de ar para o caso com janela intermediária (1x1,6m) na orientação N1 (Norte-Sul) foi de 49 ren/hora para a sala-cozinha, 127 para o quarto 1 e 100 para o quarto 2. Já para a orientação N2 (Leste-Oeste) foi de 14 ren/hora para sala-cozinha, 123 para o quarto 1 e 137 para o quarto 2. No período de março até agosto aproximadamente, os ambientes possuem as mais baixas renovações de ar, devido a velocidades de vento menores. Observou-se também que para a sala-cozinha na orientação N2 (Leste-Oeste) o fluxo de ar é menor por ser um ambiente com maior volume (proporcionalmente à área de abertura), e por estar na maior parte do ano a sotavento. Esses fluxos de ar foram diminuídos 13% em média para todos os

ambientes aproximadamente da janela maior (1x2m) à janela intermediária (1x1,6m) e em 17% para a janela menor (1x1,2m) (em relação à janela intermediária).

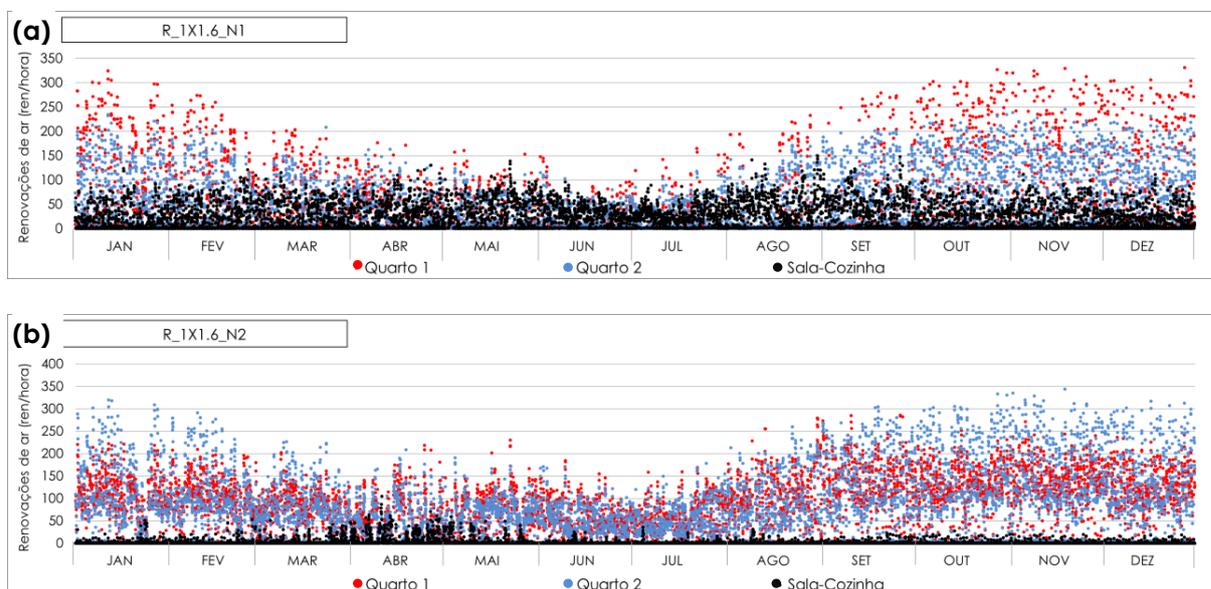


Figura 73 - Taxa de renovação de ar para todos ambientes durante um ano para os casos **(a)** R_1X1,6_N1 e **(b)** R_1X1,6_N2.

4.2.3. Impacto nas temperaturas internas

Nas Figuras 74 e 75 tem-se as temperaturas interna e externa do ar do quarto 2, com valores médios horários para todos os meses do ano, bem como a diferença nas temperaturas internas entre os casos com (E2) e sem (R) varanda nas orientações, N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste) e tamanho de janela intermediário (1X1,6m). Variações em relação ao tamanho de janela e ambiente, resultaram em padrões comportamentais similares.

Observa-se que há uma redução na temperatura devido ao acréscimo da varanda no período diurno, devido à atenuação da radiação solar direta pela presença deste elemento arquitetônico. De acordo com o padrão de abertura das janelas identificado anteriormente, estas se fecham durante o dia. Logo, o fenômeno aqui observado é exclusivamente decorrente do efeito da insolação. Durante à noite, ocorre o oposto, ou seja, o caso com varanda possui temperaturas internas mais elevadas. Isso ocorre porque a presença da varanda ocasiona uma redução nas taxas de renovação de ar do ambiente (conforme o constatado no

item 4.2.2.2). No entanto, a redução da temperatura devido à insolação é muito maior do que o seu aumento decorrente da diminuição do fluxo do ar.

Esse efeito também pode ser visto nas Figuras 76 e 77, que apresenta a diferença horária entre as temperaturas internas do ar para os três ambientes pelo acréscimo da varanda, para os casos com tamanho de janela intermediária (1x1,6m), para as duas orientações N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste), respectivamente.

Nota-se tanto a redução, quanto o aumento das temperaturas internas. No entanto, a influência do sombreamento ocorre em mais horas do ano. Além disso, o aumento da temperatura com a redução da ventilação noturna concentra-se na faixa de $0,0 < X \leq 0,1^{\circ}\text{C}$, enquanto a redução abrange faixas com diferenças ligeiramente superiores (até $0,2^{\circ}\text{C}$ para orientação N1, e $0,3^{\circ}\text{C}$ para a N2), exceto para a sala-cozinha na orientação N1. A orientação N2 (Leste-Oeste), mais desfavorável do ponto de vista da insolação, apresenta um impacto maior com a colocação deste elemento arquitetônico.

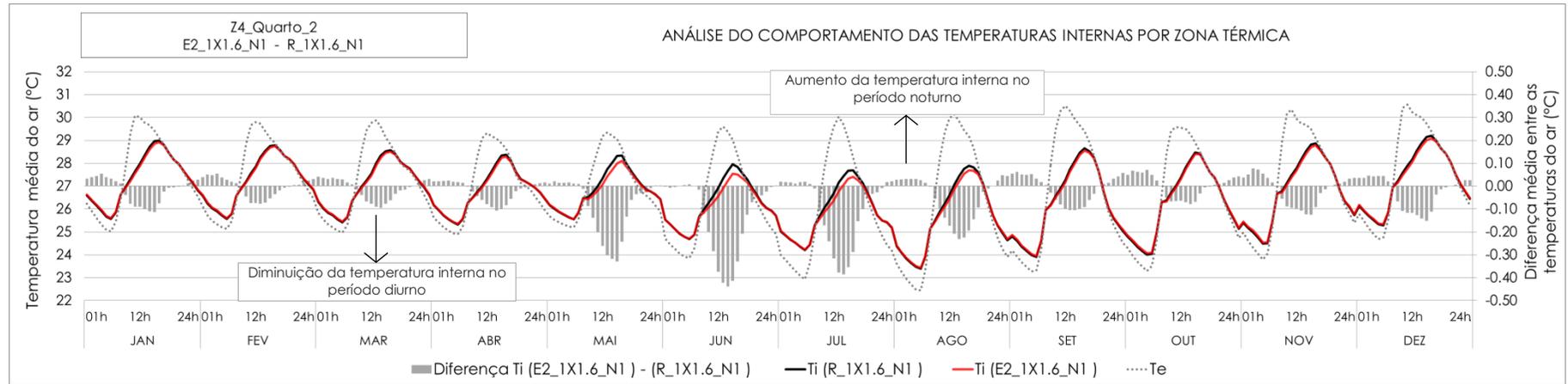


Figura 74 - Médias horárias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com (E2_1X1,6_N1) e sem (R_1X1,6_N1) varanda, do quarto 2.

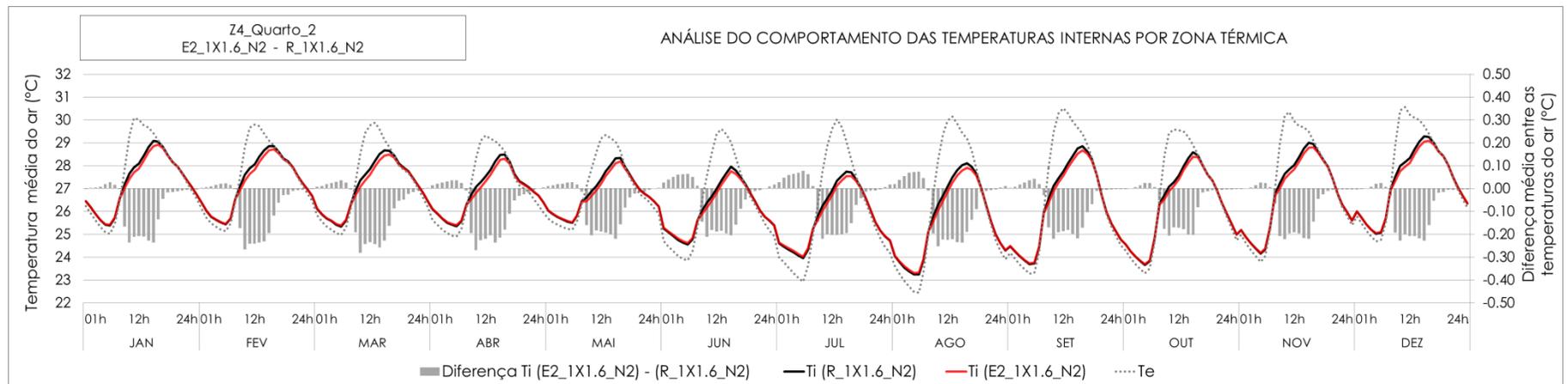


Figura 75 - Médias horárias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com (E2_1X1,6_N2) e sem (R_1X1,6_N2) varanda, do quarto 2.

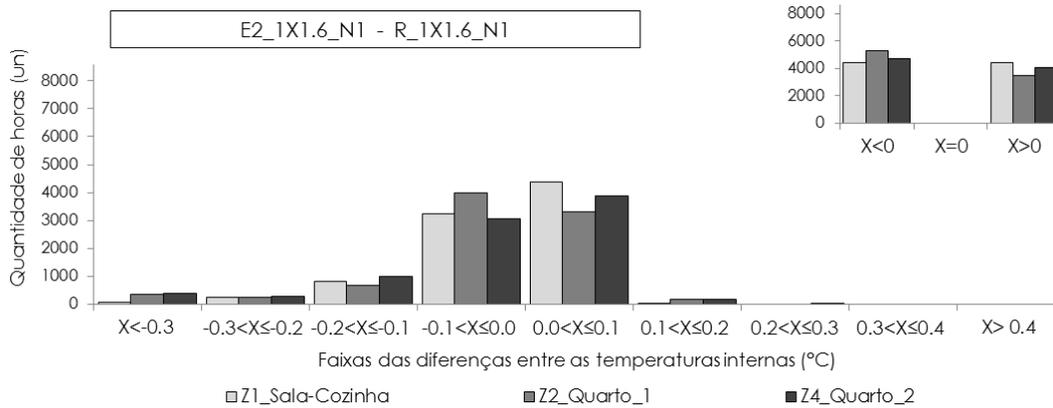


Figura 76 - Faixas de diferença entre as temperaturas internas do ar para os três ambientes dos casos com (E2_1X1,6_N1) e sem (R_1X1,6_N1) varanda.

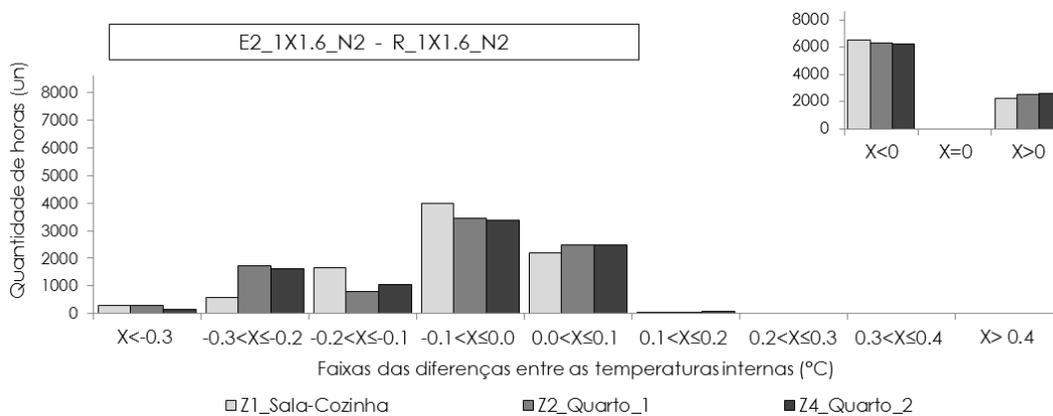


Figura 77 - Faixas de diferença entre as temperaturas internas do ar para os três ambientes dos casos com (E2_1X1,6_N2) e sem (R_1X1,6_N2) varanda.

Com o acréscimo da varanda o desconforto por calor é sempre reduzido (Figuras 78 e 79). O desconforto por frio nesse clima foi muito baixo, sendo portanto, desconsiderado. Esse impacto na redução dos graus-hora é mais pronunciado na orientação N2 (Leste-Oeste), fazendo com que ela apresente um nível de conforto mais próximo à N1 (Norte-Sul) quando esta também possui varanda (E2). Deste modo, o uso da varanda acaba compensando os efeitos de uma orientação desfavorável do ponto de vista da insolação. Observou-se também que quanto maior a área de janela, maior o desconforto por calor.

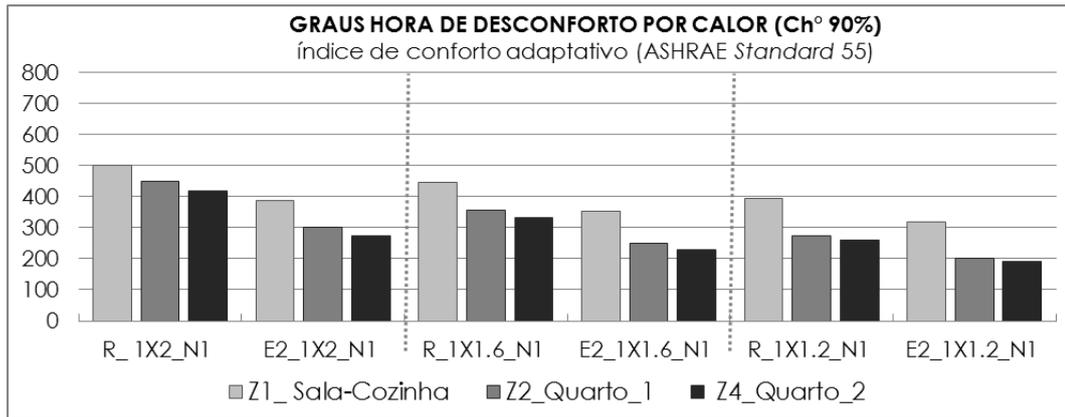


Figura 78 - Graus-hora de desconforto por calor (°Ch 90%) para todos os ambientes analisados considerando os casos dos casos com e sem varanda (E2_1X2_N1; R_1X2_N1; E2_1X1,6_N1; R_1X1,6_N1; E2_1X1,2_N1; e R_1X1,2_N1).

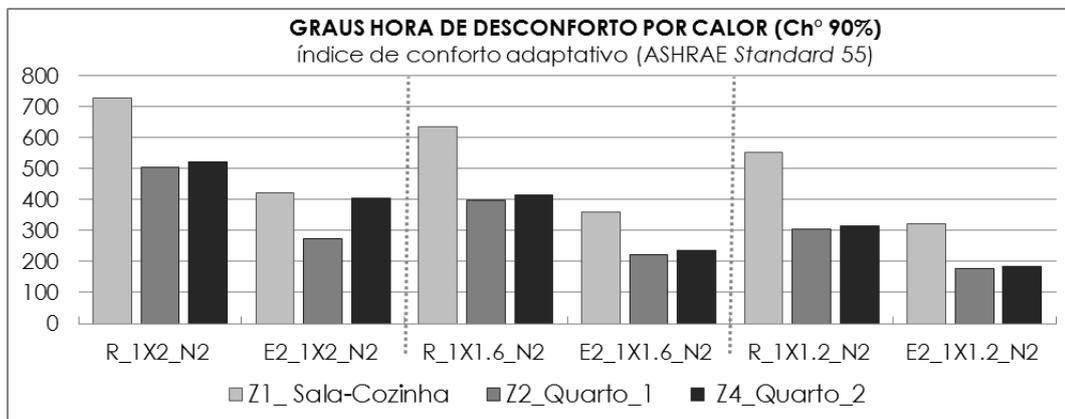


Figura 79 - Graus-hora de desconforto por calor (°Ch 90%) para todos os ambientes analisados considerando os casos com e sem varanda (E2_1X2_N2; R_1X2_N2; E2_1X1,6_N2; R_1X1,6_N2; E2_1X1,2_N2; e R_1X1,2_N2).

4.3. Influência dos dispositivos de sombreamento horizontais e tipo “L”

O estudo comparativo entre os dispositivos de proteção solar horizontais e tipo “L” é efetuado tendo-se como parâmetros os seguintes aspectos: ventilação natural (seção 4.3.1) e desempenho térmico (seção 4.3.2). Os casos relacionados nesta seção são apresentados no Quadro 12:

Sem dispositivos	Horizontais básicos	Afastados	Tipo veneziana	Tipo “L”
R_1X2_N1	H1_1X2_N1	H2_1X2_N1	H3_1X2_N1	E1_1X2_N1
R_1X2_N2	H1_1X2_N2	H2_1X2_N2	H3_1X2_N2	___
R_1X1,6_N1	H1_1X1,6_N1	H2_1X1,6_N1	H3_1X1,6_N1	E1_1X1,6_N1
R_1X1,6_N2	H1_1X1,6_N2	H2_1X1,6_N2	H3_1X1,6_N2	___
R_1X1,2_N1	H1_1X1,2_N1	H2_1X1,2_N1	H3_1X1,2_N1	E1_1X1,2_N1
R_1X1,2_N2	H1_1X1,2_N2	H2_1X1,2_N2	H3_1X1,2_N2	___

Quadro 12 - Casos de estudo relacionados com o impacto dos dispositivos de sombreamento

4.3.1. Ventilação natural

4.3.1.1. Impacto nos coeficientes de pressão e no fluxo de ar

Os Quadros 13, 14, 15 e 16 apresentam o impacto que a colocação dos diversos dispositivos causam nos Cps das janelas (representado através do quarto 1) e conseqüentemente no fluxo de ar. O impacto na ventilação natural é apresentado por meio das diferenças percentuais horárias das taxas de renovação de ar para todos os ambientes entre os casos com e sem dispositivos de proteção solar para as orientações N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste). Neste quadro são apresentados os resultados referentes à janela de dimensão intermediária (1x1,6m), pois, outros tamanhos de janela apresentaram comportamentos similares.

Verifica-se nos Quadros 13 e 14, que os dispositivos de sombreamento horizontais básico (H1) e afastado (H2) reduziram na maior parte das horas do ano a taxa de renovação de ar em todos os ambientes, e em ambas as orientações, em torno de 25%. No entanto, observa-se também um aumento do fluxo de ar (de até 25%) em menor quantidade de horas. Tal fenômeno se ajusta ao observado nas figuras sobre os impactos destes dispositivos nos Cps dos Quadros 13 e 14. Tanto a

proteção horizontal básica (H1) quanto a afastada (H2), tiveram impactos similares entre si, sendo mais acentuadas as diferenças para o dispositivo horizontal básico (H1). Na maior parte dos ângulos de incidência do vento, ou há redução da sobrepressão (quando a janela encontra-se a barlavento), ou da sucção (para a janela a sotavento), o que significa menores taxas de fluxo de ar. Nota-se também que em certos ângulos de incidência do vento existe o efeito de aumento da sucção ou da sobrepressão, sendo refletido em um aumento das taxas de renovação de ar, embora em menor proporção que o de redução.

Ao se observar o impacto da proteção horizontal tipo veneziana (H3) nos Cps apresentados no Quadro 15, vê-se que essa proteção apresenta tanto o efeito de aumento da sobrepressão ou da sucção, quanto a sua redução. No entanto, o efeito do aumento da sucção e da sobrepressão abrange uma maior quantidade de direções do vento. Este comportamento se pode observar no aumento do fluxo de ar (concentrando-se na faixa de até 25%) na orientação N2 (Leste-Oeste) com as janelas dos quartos localizadas na zona a barlavento da edificação (aumento da sobrepressão) e da sala-cozinha a sotavento da mesma (aumento da sucção). Situação similar à da sala-cozinha na orientação N1 (nesta situação o ambiente é atingido pela direção do vento de maior prevalência para este local). Enquanto o efeito de redução (na faixa de 25%) pode ser notado nos quartos na orientação N1 (Norte-Sul), pois, estes ambientes em certos períodos do ano se podem posicionar a barlavento ou a sotavento da edificação.

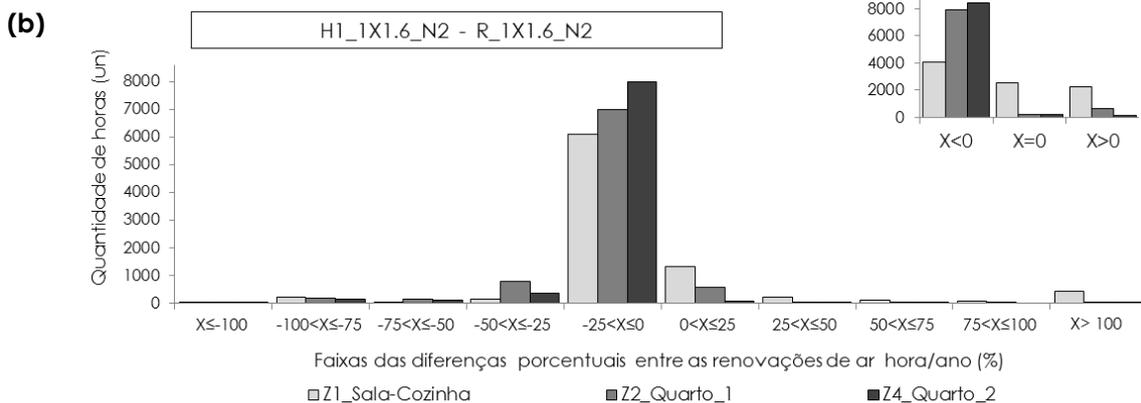
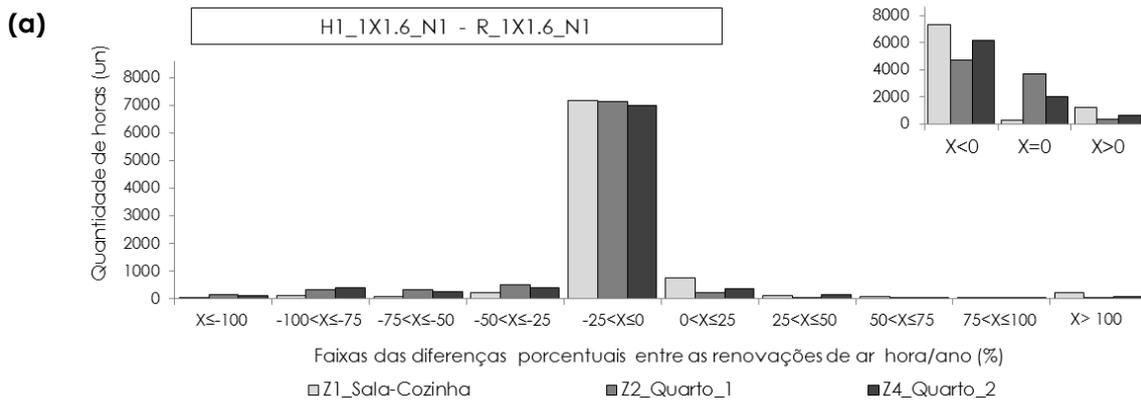
Para o dispositivo de sombreamento tipo "L" (E1) (Quadro 16), embora, haja horários com um acréscimo das taxas de renovação de ar (de forma mais evidente para o quarto 2), o maior efeito foi o de redução do fluxo de ar (com diferença em até 25%). Fenômeno derivado da redução da sobrepressão e/ou sucção que este elemento gera nos Cps. Lembrando que este dispositivo só foi simulado para uma orientação, na qual pudesse captar os ventos de maior frequência para esta cidade.

Impacto nos Cps



Diferença entre os Cps por ângulo de incidência do vento do quarto 1 para os caso H1_1X1,6 - R_1X1,6.

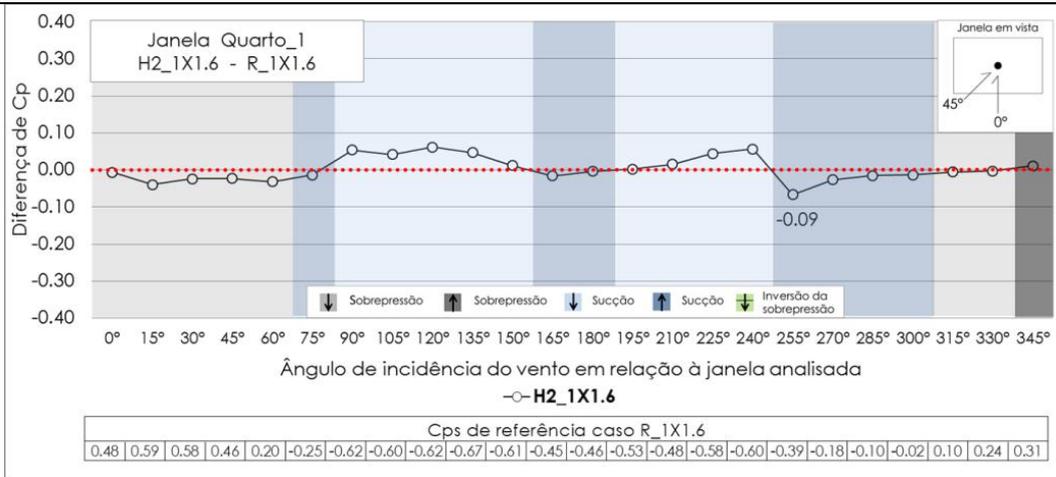
Impacto no fluxo de ar



Faixas de diferença percentual das taxas de renovação de ar para todos os ambientes nas orientações N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste) dos casos (a) H1_1X1,6_N1 - R_1X1,6_N1 e (b) H1_1X1,6_N2 - R_1X1,6_N2, respectivamente.

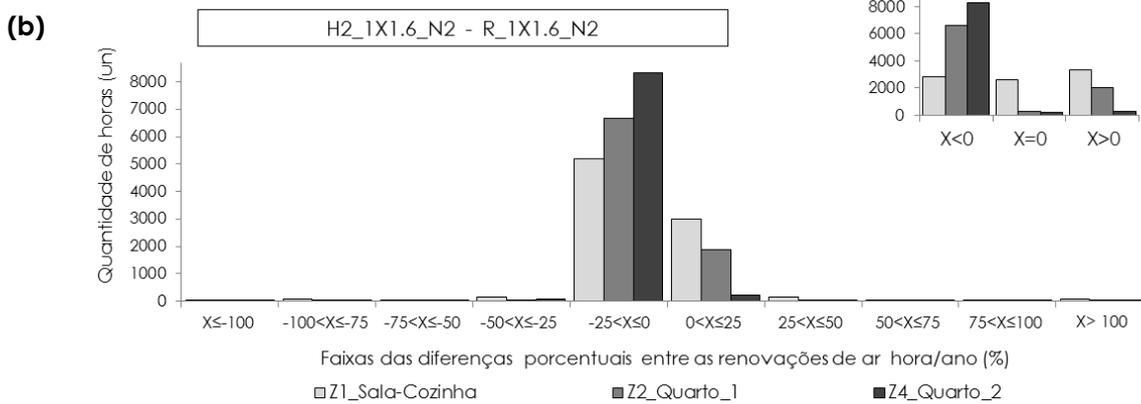
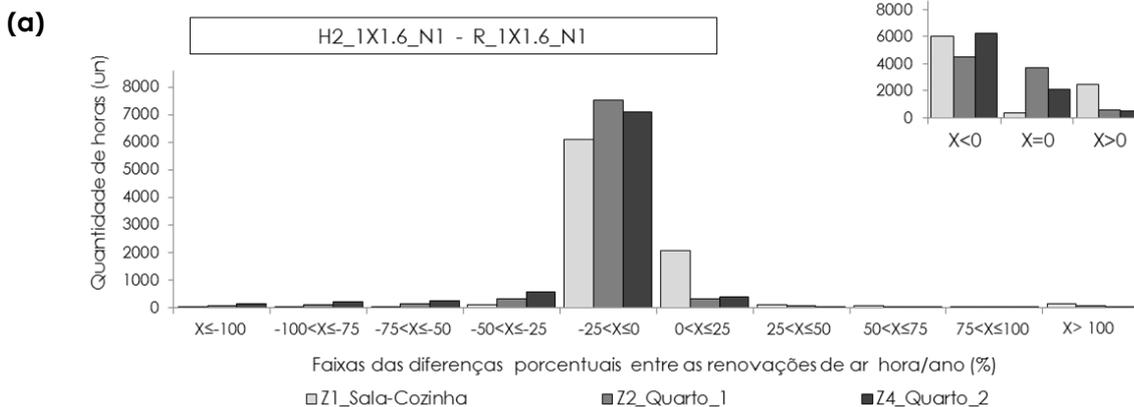
Quadro 13 - Diferenças nos Cps e nas taxas de renovações de ar dos casos com dispositivo de sombreamento horizontal básico (H1) e sem (R), com tamanho de janela intermediária (1x1,6m).

Impacto nos Cps



Diferença entre os Cps por ângulo de incidência do vento do quarto 1 para os caso H2_1X1,6 - R_1X1,6

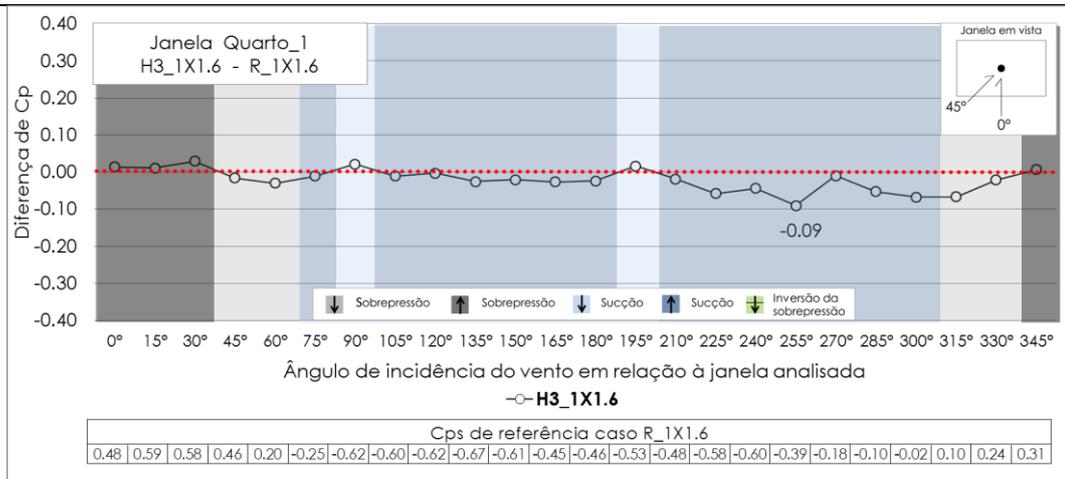
Impacto no fluxo de ar



Faixas de diferença percentual das taxas de renovação de ar para todos os ambientes nas orientações N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste) dos casos (a) H2_1X1,6_N1 - R_1X1,6_N1 e (b) H2_1X1,6_N2 - R_1X1,6_N2, respectivamente.

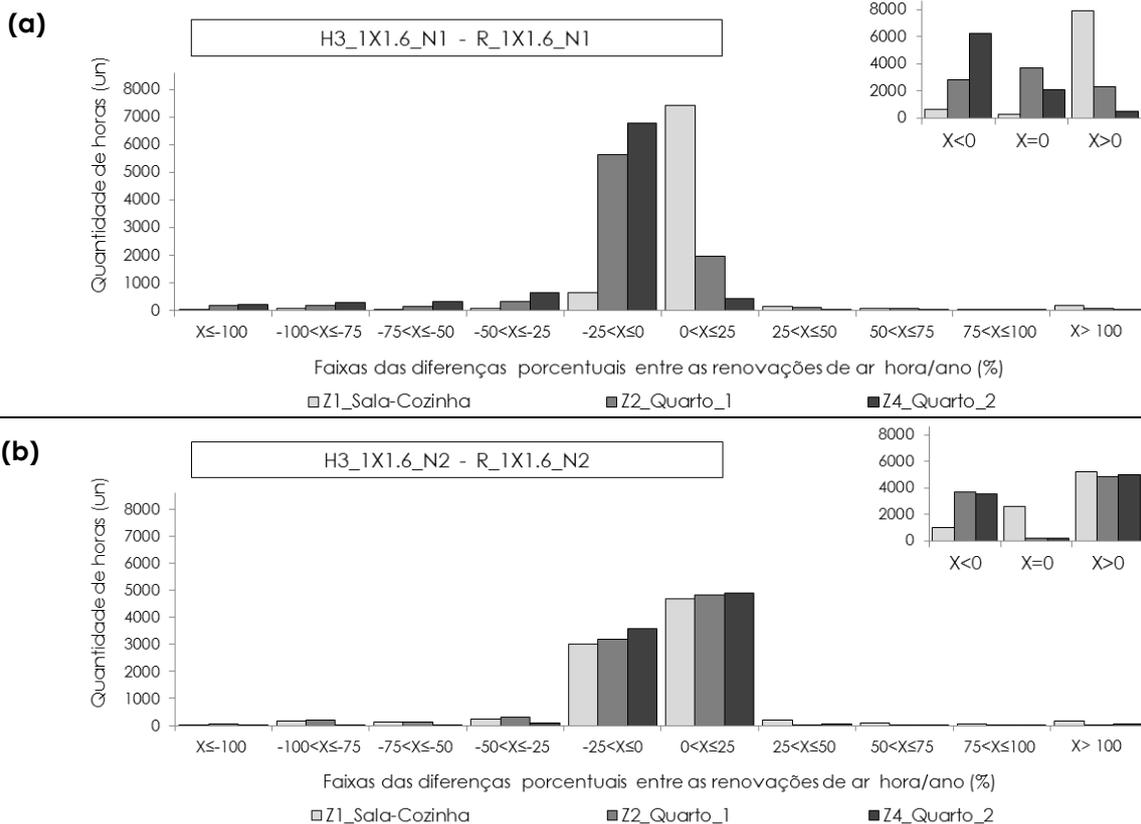
Quadro 14 - Diferenças nos Cps e nas taxas de renovações de ar dos casos com dispositivo de sombreamento horizontal afastado (H2) e sem (R), com tamanho de janela intermediária (1x1,6m).

Impacto nos Cps



Diferença entre os Cps por ângulo de incidência do vento do quarto 1 para os caso H3_1X1,6 - R_1X1,6

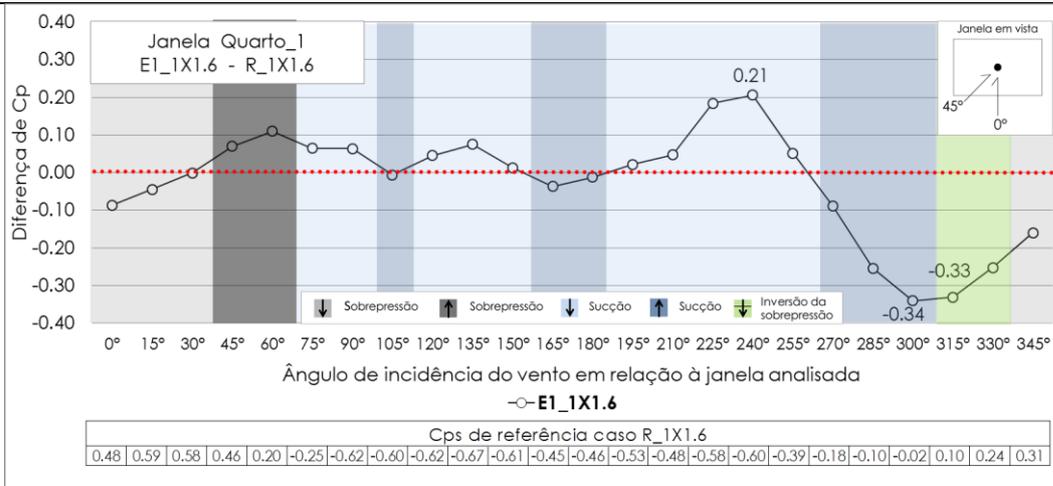
Impacto no fluxo de ar



Faixas de diferença percentual das taxas de renovação de ar para todos os ambientes nas orientações N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste) dos casos (a) H3_1X1,6_N1 - R_1X1,6_N1 e (b) H3_1X1,6_N2 - R_1X1,6_N2, respectivamente.

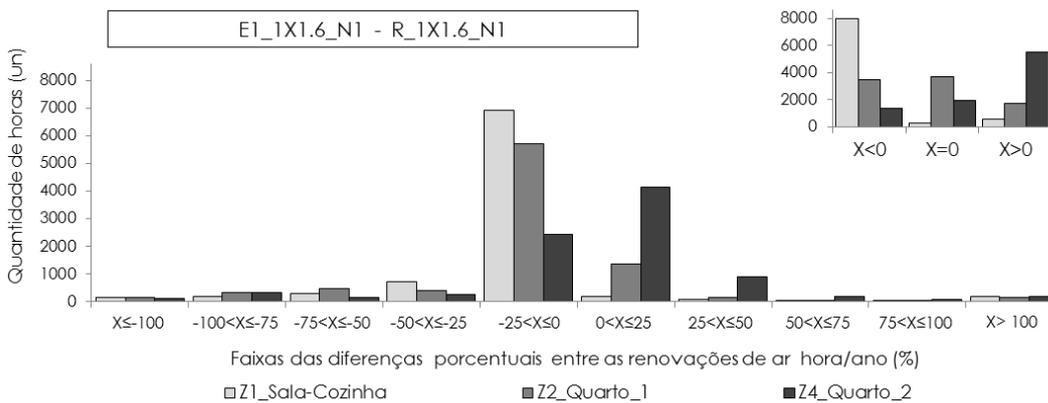
Quadro 15 - Diferenças nos Cps e nas taxas de renovações de ar dos casos com dispositivo de sombreamento horizontal tipo veneziana (H3) e sem (R), com tamanho de janela intermediária (1x1,6m).

Impacto nos Cps



Diferença entre os Cps por ângulo de incidência do vento do quarto 1 para os caso E1_1X1,6 - R_1X1,6

Impacto no fluxo de ar



Faixas de diferença percentual das taxas de renovação de ar para todos os ambientes nas orientações N1 (Norte-Sul) dos casos (E1_1X1,6_N1 - R_1X1,6_N1).

Quadro 16 - Diferenças nos Cps e nas taxas de renovações de ar dos casos com dispositivo de sombreamento tipo “L” (E1) e sem (R), com tamanho de janela intermediária (1x1,6m).

Para todos os casos (com proteções solares ou sem), o horário de ventilação na habitação ocorreu durante o período de menores temperaturas ao longo do dia, ou seja, desde o final da tarde até o início da manhã, conforme apresentado na Figura 80. Nas simulações, a ventilação foi permitida durante as 24 horas, desde que a temperatura do ar interior fosse maior que 20°C, e menor que a exterior. Desta forma, as janelas permaneceram sempre fechadas ao longo do dia, devido às altas temperaturas do local e abertas no período noturno, pois, as temperaturas do ar externo foram menores que as internas e nunca foi atingido o limite de 20°C.

Esse padrão permaneceu constante durante todo o ano, devido à uniformidade climática de Natal.

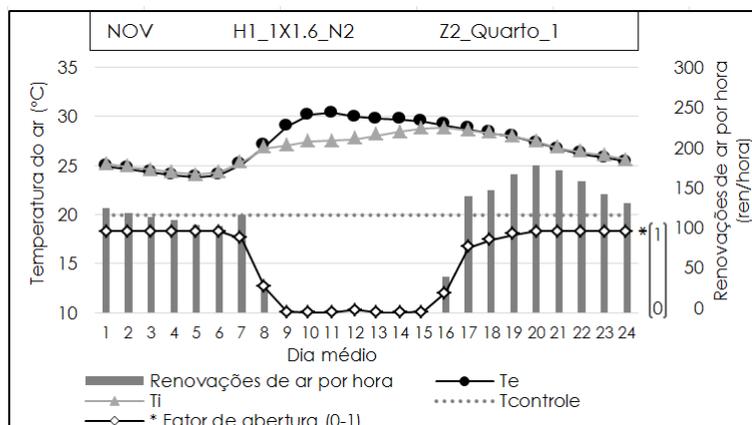


Figura 80 - Valores médios horários para as temperaturas do ar externa e interna, taxa de renovação de ar, e fator de abertura da janela do quarto 1 em novembro, do caso H1_1X1,6_N2.

Esse efeito predominante de redução do fluxo de ar se dá em relação às taxas de renovação obtidas para a habitação no clima em questão, que podem ser consideradas altas, conforme pode ser visto na Figura 73, referente aos casos sem dispositivos (R), orientação N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste) com tamanho de janela de 1x1,6m. A média das máximas diárias das taxa de renovação de ar para o caso com janela intermediária (1x1,6m) na orientação N1 (Norte-Sul) foi de 49 ren/hora para a sala-cozinha, 127 para o quarto 1 e 100 para o quarto 2. Já para a orientação N2 (Leste-Oeste) foi de 14 ren/hora para sala-cozinha, 123 para o quarto 1 e 137 para o quarto 2. No período de março até agosto aproximadamente, os ambientes possuem as mais baixas renovações de ar, devido a velocidades de vento menores. Observou-se também que para a sala-cozinha na orientação N2 (Leste-Oeste) o fluxo de ar é menor por ser um ambiente com maior volume (proporcionalmente à área de abertura), e por estar na maior parte do ano a sotavento. Esses fluxos de ar foram diminuídos 13% em média para todos os ambientes aproximadamente da janela maior (1x2m) à janela intermediária (1x1,6m) e em 17% para a janela menor (1x1,2m) (em relação à janela intermediária).

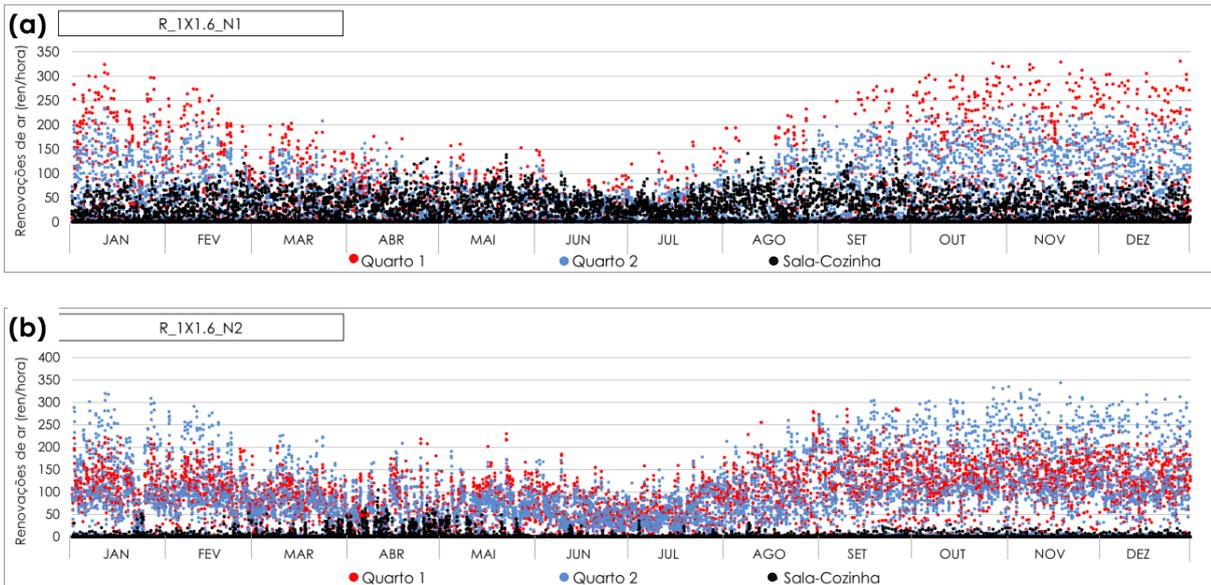


Figura 73 - Taxa de renovação de ar para todos ambientes durante um ano para os casos **(a)** R_1X1,6_N1 e **(b)** R_1X1,6_N2.

4.3.2. Impacto no desempenho térmico

Os impactos nas temperaturas internas pela inclusão dos elementos de sombreamento são apresentados nas Figuras 81, 82, 83, 84, 85, 86 e 87. Nestas figuras são plotadas as temperaturas interna e externa do ar, com valores médios horários para todos os meses do ano, bem como a diferença nas temperaturas internas entre os casos com e sem dispositivos de sombreamento nas orientações, N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste) referente à janela intermediária (1X1,6m) dos quartos 1 e 2. Foram omitidas as informações relacionadas com outros tamanhos de janela, já que apresentam comportamentos similares aos fenômenos aqui relacionados.

Para a maioria dos casos a inclusão do dispositivo de sombreamento implicou uma diminuição da temperatura interna no período diurno, como consequência exclusiva do sombreamento que este elemento proporciona, pois, a ventilação nesse período não foi permitida (só por infiltração). No período propício para esta acontecer (ventilação noturna), foi notada uma relação entre o impacto sofrido pela inserção destes elementos na diminuição ou aumento do fluxo de ar com os impactos nas temperaturas internas.

Estes fenômenos são evidenciados também nos gráficos (a) e (b) que compõem as Figuras 88, 89, 90 e 91 com a diferença horária entre as temperaturas internas do ar para os três ambientes pela inclusão dos dispositivos de

sombreamento. Para todos eles os resultados apresentados correspondem aos casos com tamanho de janela intermediária (1x1,6m) para as duas orientações N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste), pois, outros tamanhos de janela tiveram impactos semelhantes.

Observa-se que o impacto mais acentuado pelo acréscimo do dispositivo horizontal básico na orientação N2 (Leste-Oeste) foi o de diminuição da temperatura interna (na faixa de até $-0,2^{\circ}\text{C}$ MODIFICQUE DE 0,1). No entanto para a orientação N1 (Norte-Sul) as diferenças entre a diminuição e o aumento ao longo do ano são proporcionalmente similares, sendo o aumento agrupado maioritariamente na faixa de até $0,1^{\circ}\text{C}$ e a diminuição em faixas mais variadas. Assim, apesar de que na orientação N1 as diferenças positivas e negativas foram próximas, o efeito sobre a insolação que este elemento traz consigo em ambas as orientações, faz que sobressaia acima do aumento da temperatura pela diminuição do fluxo de ar, conforme também pode ser constatado nas Figuras 81 e 82.

Para os casos com proteções afastadas, o impacto mais evidente foi o de diminuição da temperatura do ar interna na orientação N1 (Norte-Sul) e aumento na orientação N2 (Leste-Oeste). Observa-se nesta situação que mesmo que a diminuição do fluxo para ambas as orientações tenha atingido faixas similares (ao redor de 25%) (ver Quadro 14), a ineficácia deste dispositivo na orientação N2 (Leste-Oeste) em evitar os ganhos de calor, acaba com que, ao longo do ano, a diminuição no fluxo de ar tenha mais influência no aumento das temperaturas internas que a diminuição por insolação (a faixa de este aumento foi de até $0,1^{\circ}\text{C}$).

O impacto devido à colocação do dispositivo tipo veneziana (H3) ocasionou para todas as orientações, e na maioria dos ambientes a diminuição das temperaturas internas na maior parte do ano. Esta diferença foi maioritariamente agrupada na faixa de até $0,1^{\circ}\text{C}$. Conforme o Quadro 15, este elemento propiciou um aumento da taxa de renovação de ar de até 25%, significando uma diminuição nas temperaturas internas. Desta forma, estas diminuições podem ser decorrentes tanto do sombreamento quanto da ventilação noturna.

O efeito predominante pela presença do dispositivo de sombreamento tipo "L" (E1) na orientação estudada, foi o de diminuição da temperatura concentrando-se na faixa de $0,1^{\circ}\text{C}$. Fenômeno derivado principalmente do bloqueio da radiação solar direta. De acordo com a Figura 87 referente às

diferenças entre as temperaturas internas para o quarto 1 é possível observar como este elemento em algumas ocasiões consegue aumentar ou diminuir a temperatura interna no período noturno, ideia reforçada pelo já observado no Quadro 16, referente aos impactos deste elemento nos Cps e no fluxo de ar. No entanto, a redução das temperaturas internas neste período prevaleceu sobre a de diminuição nos três ambientes.

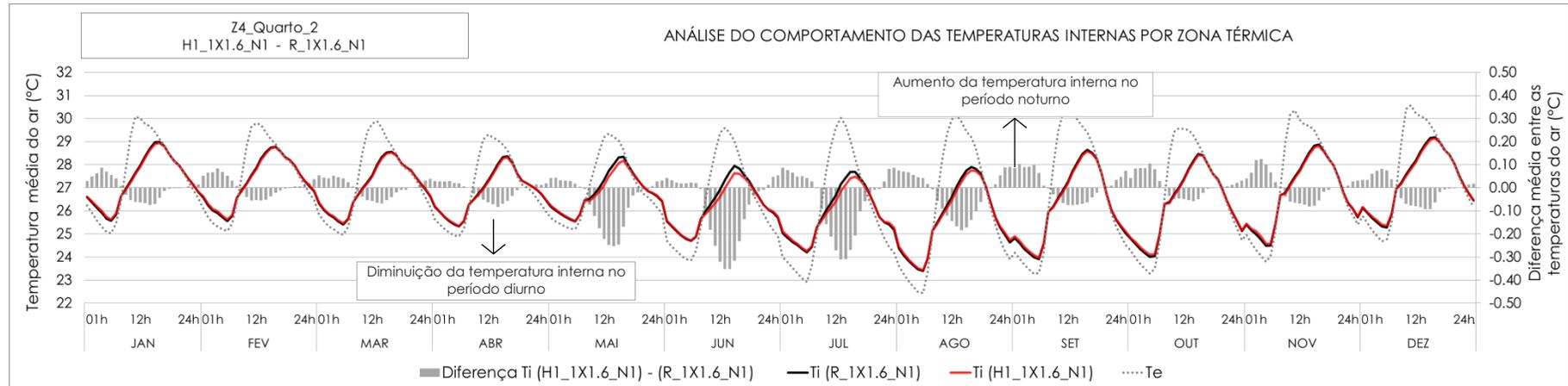


Figura 81 - Médias horárias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com (H1_1X1,6_N1) e sem (R_1X1,6_N1) dispositivo de sombreamento horizontal básico, do quarto 2.

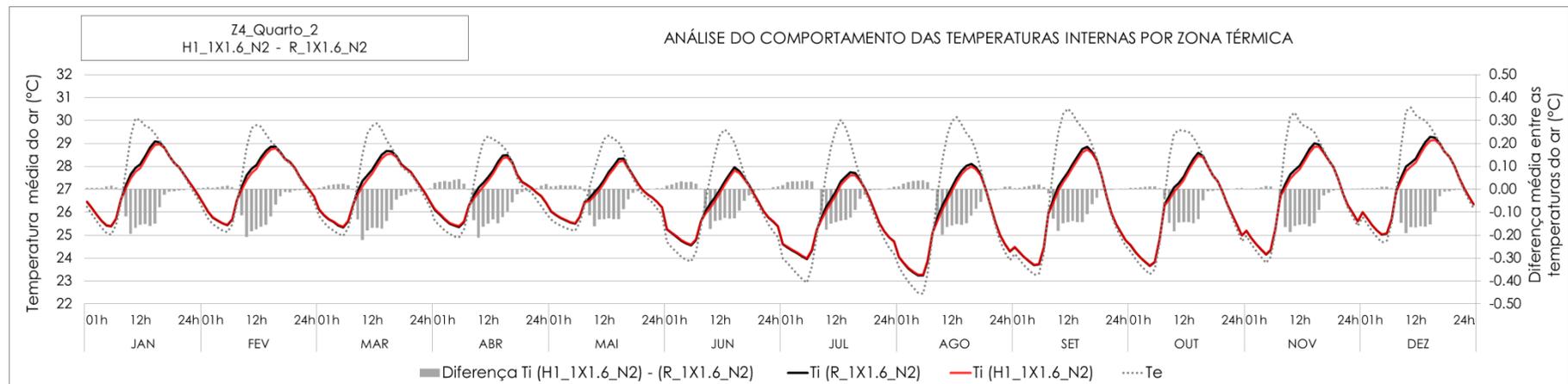


Figura 82 - Médias horárias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com (H1_1X1,6_N2) e sem (R_1X1,6_N2) dispositivo de sombreamento horizontal básico, do quarto 2.

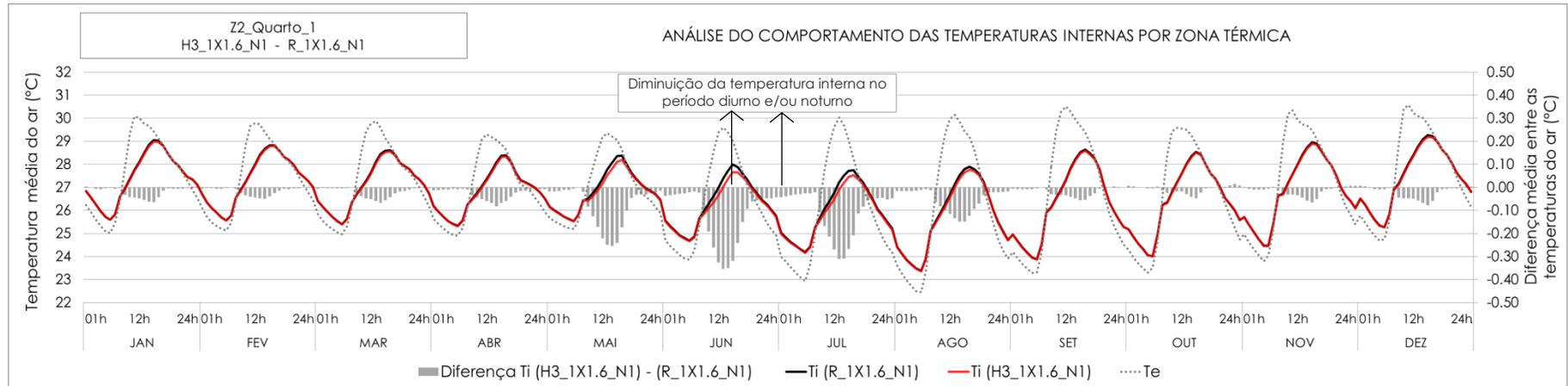


Figura 85 - Médias horárias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com (H3_1X1,6_N1) e sem (R_1X1,6_N1) dispositivo de sombreamento tipo veneziana, do quarto 1.

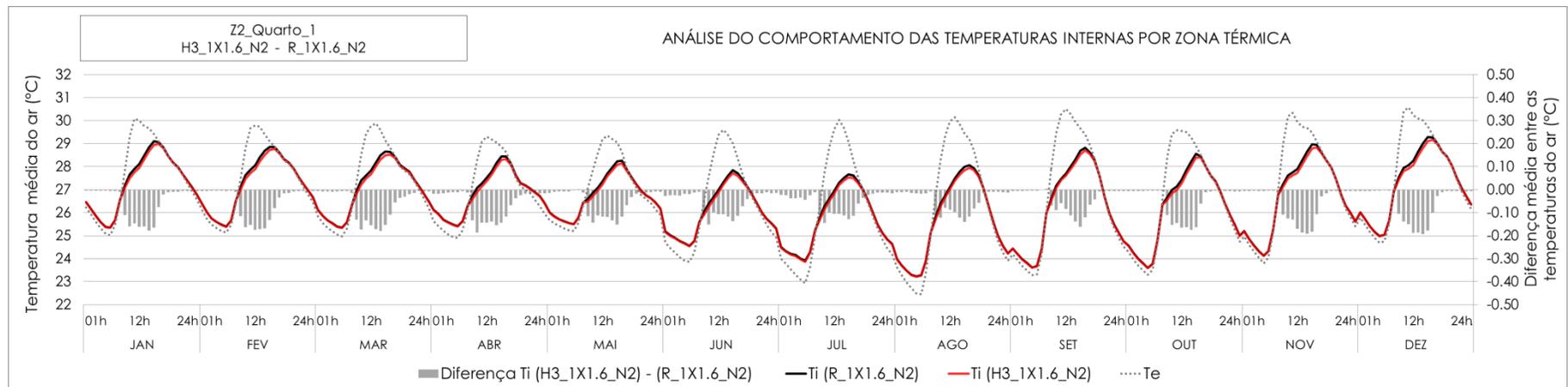


Figura 86 - Médias horárias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com (H3_1X1,6_N2) e sem (R_1X1,6_N2) dispositivo de sombreamento tipo veneziana, do quarto 1.

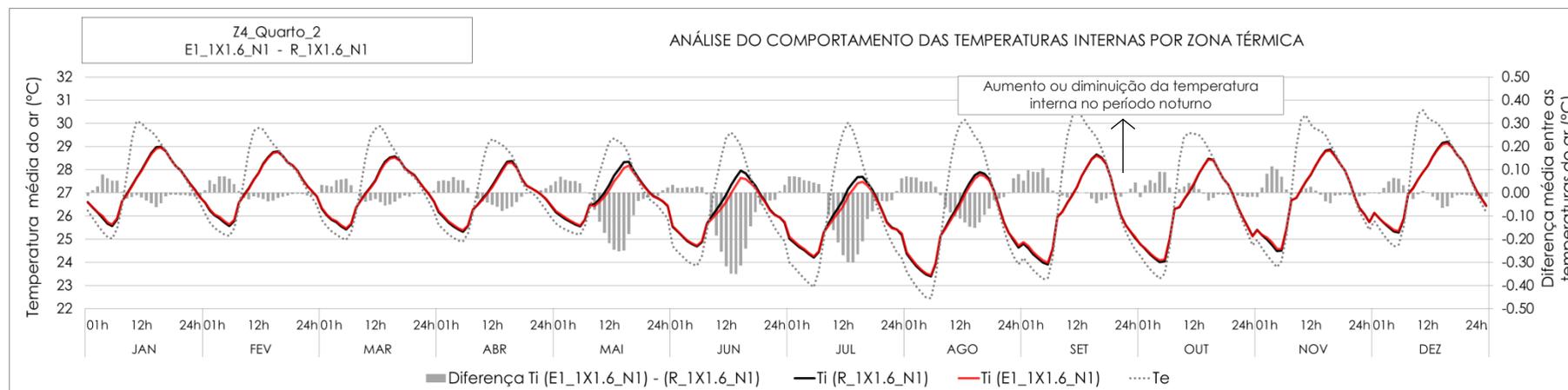


Figura 87 - Médias horárias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com (E1_1X1,6_N1) e sem (R_1X1,6_N1) dispositivo de sombreamento tipo “L”, do quarto 2.

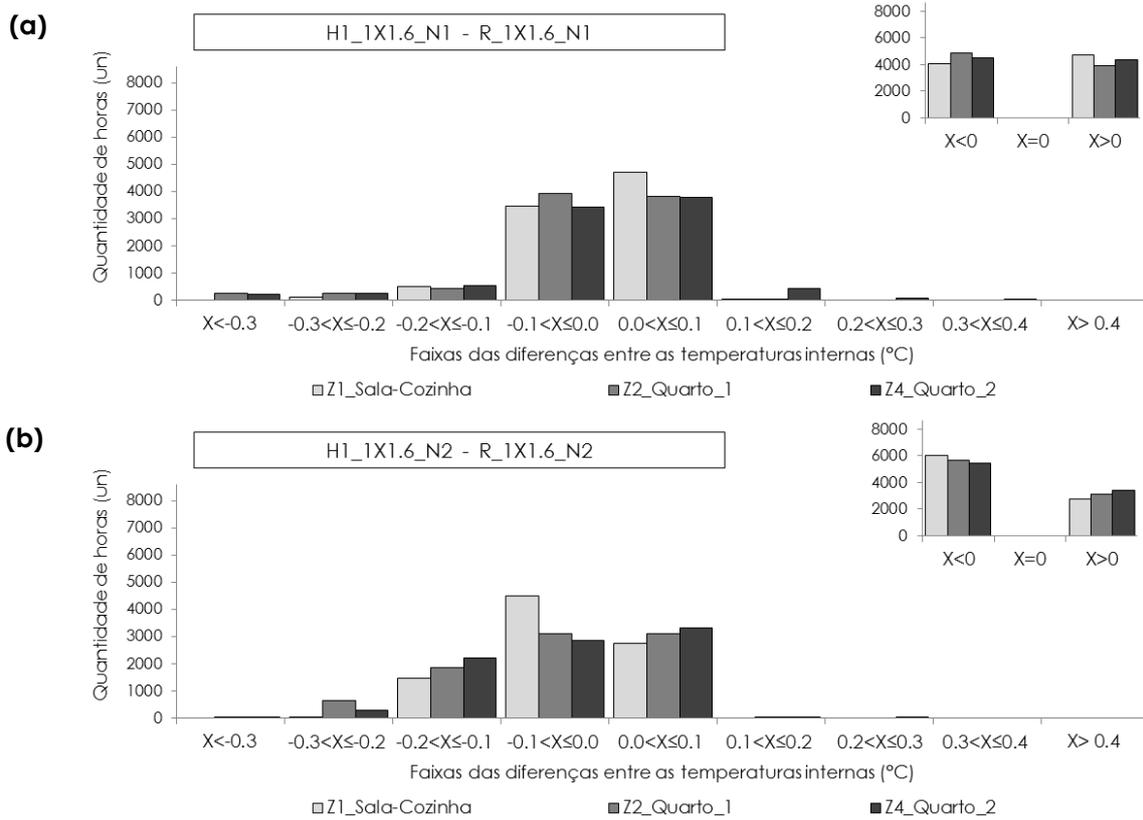


Figura 88 - Faixas das diferenças nas temperaturas internas para todos os ambientes nas orientações N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste) dos casos **(a)** H1_1X1,6_N1 - R_1X1,6_N1 e **(b)** H1_1X1,6_N2 - R_1X1,6_N2.

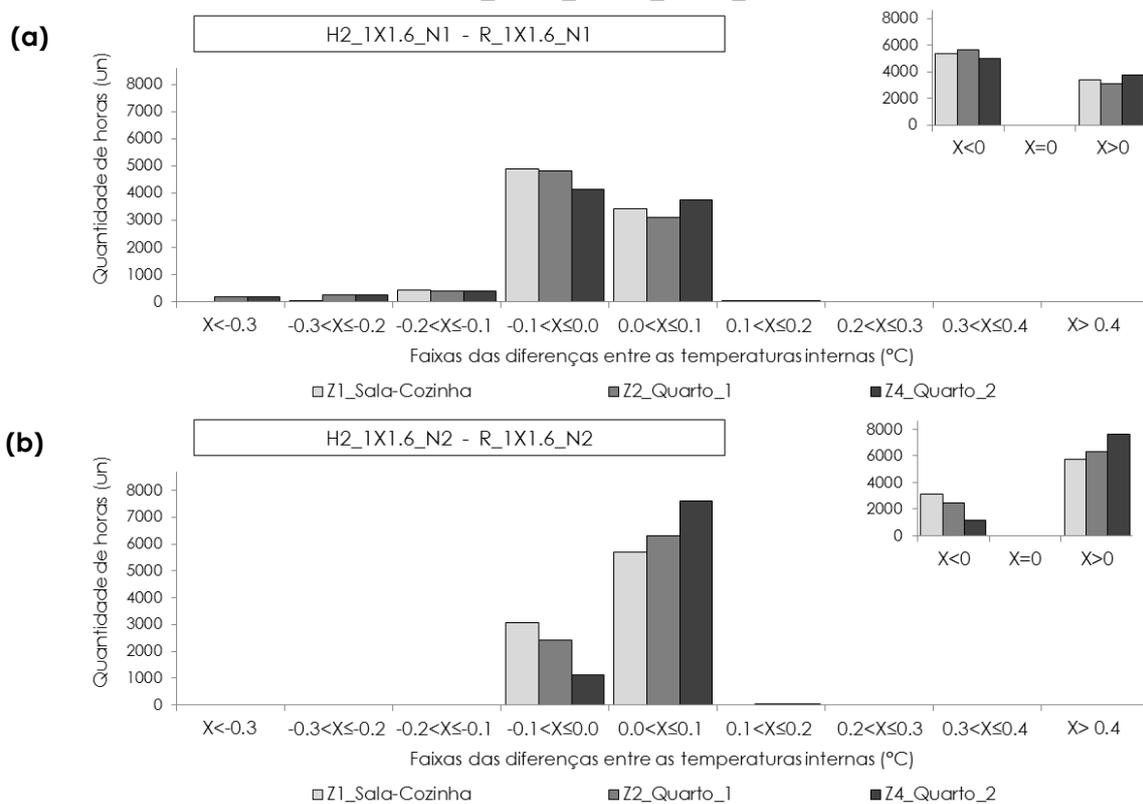


Figura 89 - Faixas das diferenças nas temperaturas internas para todos os ambientes nas orientações N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste) dos casos **(a)** H2_1X1,6_N1 - R_1X1,6_N1 e **(b)** H2_1X1,6_N2 - R_1X1,6_N2.

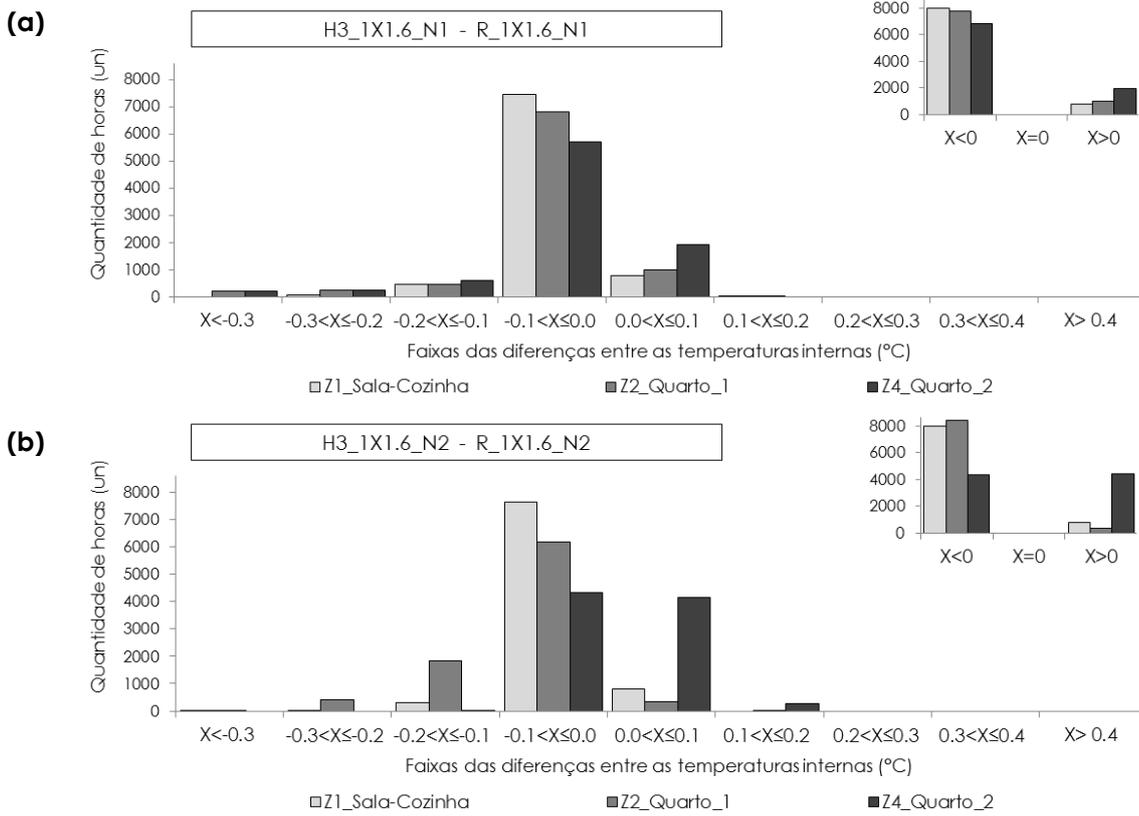


Figura 90 - Faixas das diferenças nas temperaturas internas para todos os ambientes nas orientações N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste) dos casos **(a)** H3_1X1,6_N1 - R_1X1,6_N1 e **(b)** H3_1X1,6_N2 - R_1X1,6_N2.

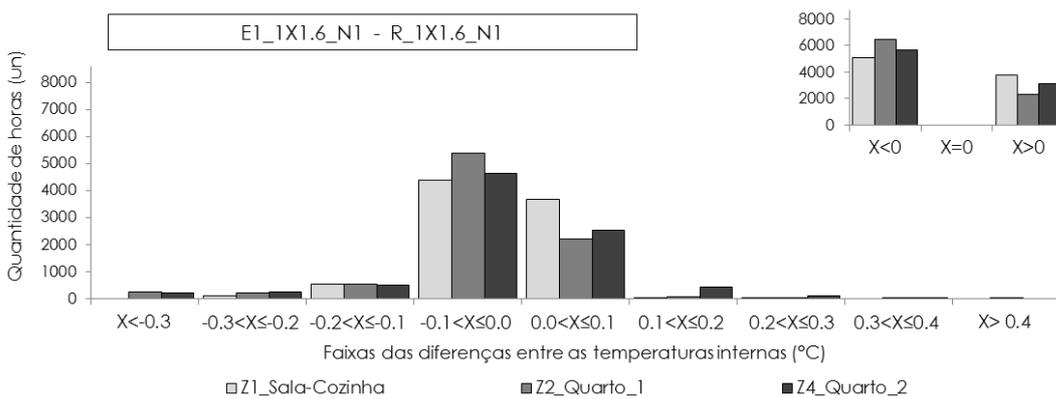


Figura 91 - Faixas das diferenças nas temperaturas internas para todos os ambientes na orientação N1 (Norte-Sul) dos casos E1_1X1,6_N1 - R_1X1,6_N1.

4.4. Influência do muro

O impacto da inclusão do muro na edificação estudada é avaliado com relação a três aspectos: (1) impacto no fluxo de ar (item 4.4.1); (2) sombreamento devido ao muro (item 4.4.2) e (3) impacto nas temperaturas interiores (item 4.4.3). Os casos a que se referem os resultados desta seção são relacionados no Quadro 17:

Sem muros	Com muros	Com varandas	Com varandas mais muros
R_1X2_N1	RM_1X2_N1	E2_1X2_N1	E2_M_1X2_N1
R_1X2_N2	RM_1X2_N2	E2_1X2_N2	E2_M_1X2_N2
R_1X1,6_N1	RM_1X1,6_N1	E2_1X1,6_N1	E2_M_1X1,6_N1
R_1X1,6_N2	RM_1X1,6_N2	E2_1X1,6_N2	E2_M_1X1,6_N2
R_1X1,2_N1	RM_1X1,2_N1	E2_1X1,2_N1	E2_M_1X1,2_N1
R_1X1,2_N2	RM_1X1,2_N2	E2_1X1,2_N2	E2_M_1X1,2_N2
Grupo de casos comparados		Grupo de casos comparados	

Quadro 17 - Casos de estudos relacionados com o impacto do muro

4.4.1. Impacto no fluxo de ar

4.4.1.1. Períodos de ventilação

Nas simulações computacionais realizadas no EP, para que as janelas dos ambientes de maior permanência (sala-cozinha e quartos) fossem abertas tiveram que ser satisfeitas simultaneamente duas condições: (1) temperatura do ar interna maior que a externa, e (2) temperatura do ar interna maior que 20°C. Essas condições foram permitidas durante as 24 horas do dia. Com isso, foi possível observar os horários de abertura de janela mais eficientes.

Esse período de abertura de janela propício para que aconteça a ventilação, foi o mesmo para todos os meses do ano, e para todos os casos estudados com e sem muro. Assim, o horário indicado pelas simulações foi desde o final do dia até o início da manhã (das 16h às 8h aproximadamente), conforme indicado na Figura 92 referente ao quarto 1, do caso com muro, tamanho de janela de 1x1,6m e orientação N2 (Leste-Oeste). Nesse gráfico, verifica-se que, no fim do dia, existe uma diminuição da temperatura do ar externa, de modo que ela se torna menor que a interior, permitindo que haja ventilação. Como a temperatura

de 20°C nunca é atingida, de noite, as janelas em nenhum momento são fechadas. No período diurno, a temperatura externa é superior à externa, fazendo com que as janelas se fechem nesse período.

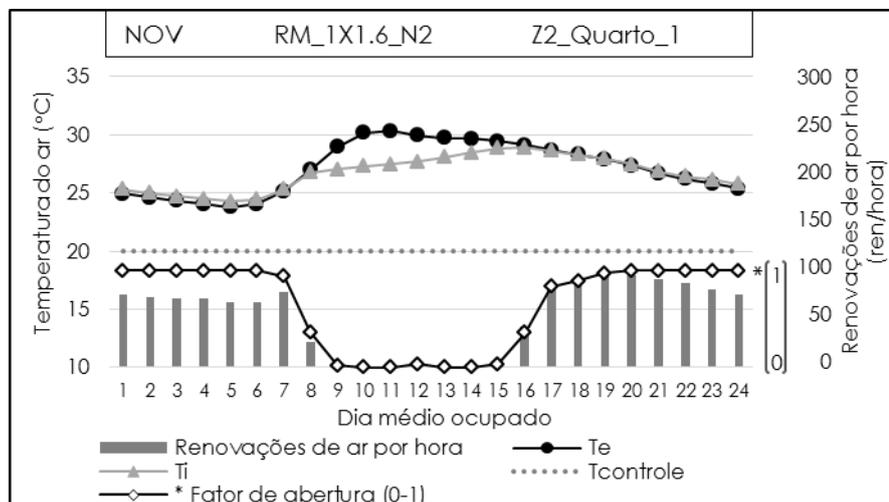


Figura 92 - Valores médios horários para as temperaturas do ar externa e interna, taxa de renovação de ar, e fator de abertura da janela do quarto 1 em novembro, do caso RM_1X1,6_N2.

4.4.1.2 Diferenças na taxa de renovação de ar

Os Quadros 18 e 19 ilustram a diferença entre os Cps dos casos com (RM) e sem (R) muro, e com varanda mais muro (E2_M) e com varanda (E2) por ângulo de incidência do vento, respectivamente. A diferença entre os Cps é decorrente da média entre os Cps obtida a partir do túnel de vento para cada ponto da área de janela do quarto 1. Os Quadros 18 e 19 também apresentam as diferenças percentuais horárias das taxas de renovação de ar entre os dos casos com (RM) e sem (R) muro, e varanda mais muro (E2_M) e com varanda (E2), para as orientações Norte-Sul (N1) e Leste-Oeste (N2), respectivamente. Ambos os quadros fazem referencia aos resultados para a janela intermediária (1x1,6m), já que impactos semelhantes foram observados quando este parâmetro foi variado.

Os resultados mostraram que a presença do muro de fechamento acarretou tanto diferenças positivas quanto negativas na taxa de renovação de ar, sendo mais acentuado o efeito de redução para ambas as orientações, e na maioria dos ambientes. Esta redução do fluxo de ar foi para a maior parte das horas do ano de 50% para o caso com muro (RM), e de até 75% para o caso com varanda mais muro (E2_M). Este efeito confirma o observado nas figuras dos Quadros 18 e 19 que

ilustram os impactos deste elemento nos Cps. Nestas análises verificou-se o predomínio da redução do efeito de sucção e o de inversão da sobrepressão (os ângulos de incidência do vento com efeitos de sobrepressão para os casos sem muro, sofrem inversão para sucção nos casos com muros). O ambiente da sala-cozinha na orientada N2 (Leste-Oeste), teve um comportamento contrario ao já mencionado, este fenômeno será explicado mais adiante.

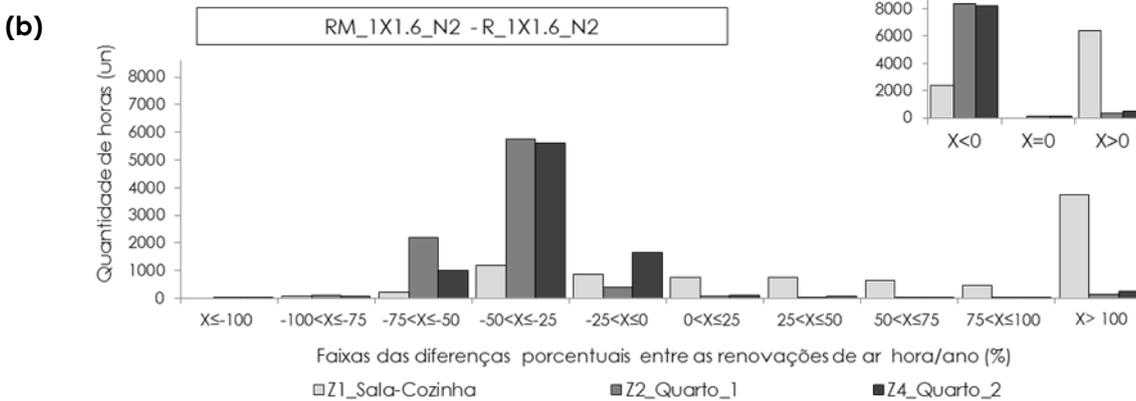
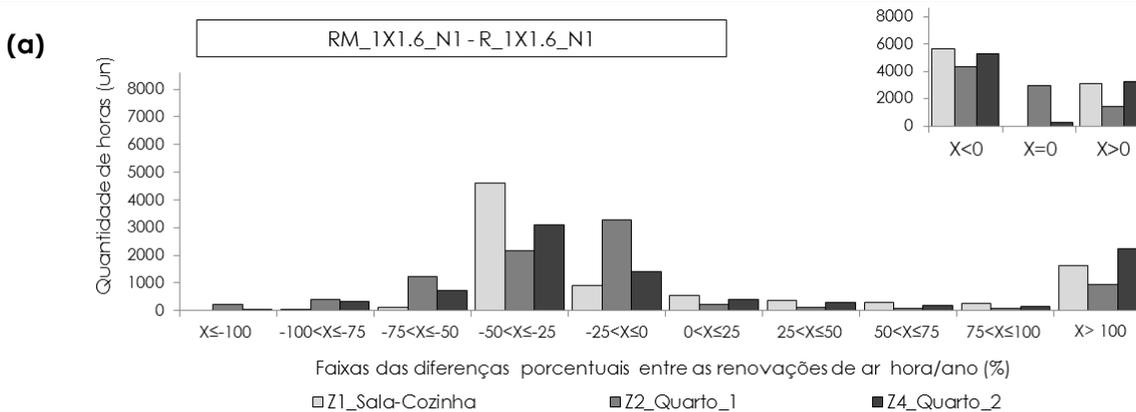
Como também foi descrito nos Quadros 18 e 19 (figuras sobre o impacto nos Cps), existe para os casos com muro situações com aumento do efeito de sucção para alguns ângulos de incidência do vento (ângulos de incidência do vento em relação à janela de 150° e 165°, 270° e 300° para o casos (RM), e ângulos de 150° e 165°, e 300° para o caso (E2_M)). São justamente estes ângulos nos quais a sala-cozinha se posiciona na zona a sotavento da edificação. Tais condições fazem com que este ambiente apresente diferenças positivas na maior parte do ano e superiores a 100%. Essa alta porcentagem de aumento é devido ao baixo fluxo de ar neste ambiente (Figura b do Quadro 19 sobre impacto no fluxo de ar), o que faz com que, um aumento de mais de 100% não se traduza em altas taxas de renovação de ar. O mesmo fenômeno acontece para todos os ambientes na orientação N1 (Norte-Sul) mas de forma menos evidente, pois, a incidência do vento nesta orientação permite intercalar em certos horários o ambiente a sotavento da edificação, além deles possuírem taxa de renovação de ar maiores.

Impacto nos Cps



Diferença entre os Cps por ângulo de incidência do vento do quarto 1 para os caso RM_1X1,6 - R_1X1,6

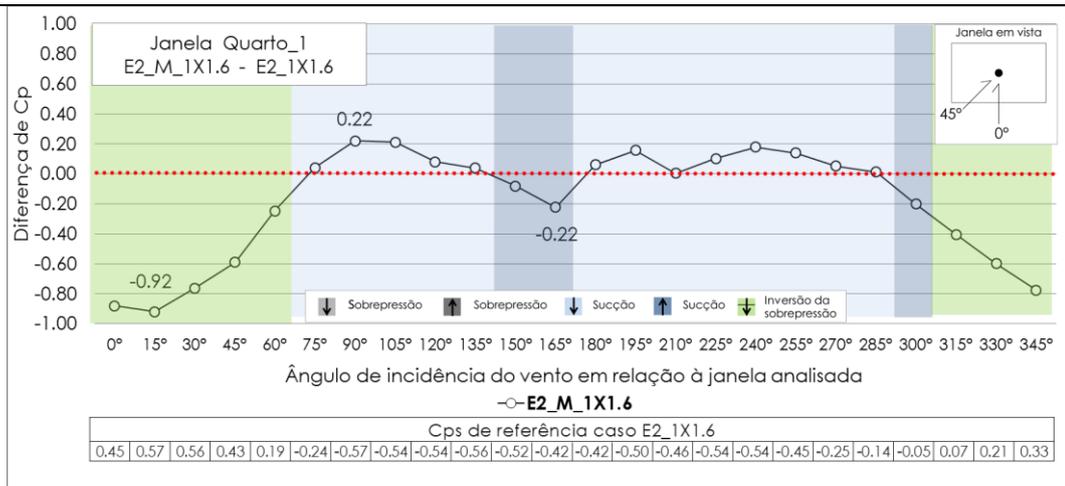
Impacto no fluxo de ar



Faixas de diferença percentual das taxas de renovação de ar para todos os ambientes nas orientações N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste) dos casos (a) RM_1X1,6_N1 - R_1X1,6_N1 e (b) RM_1X1,6_N2 - R_1X1,6_N2, respectivamente.

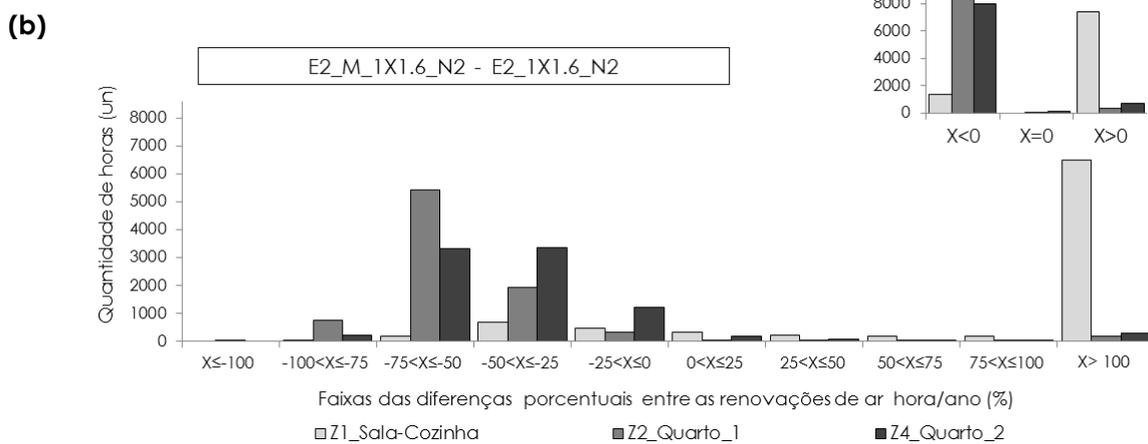
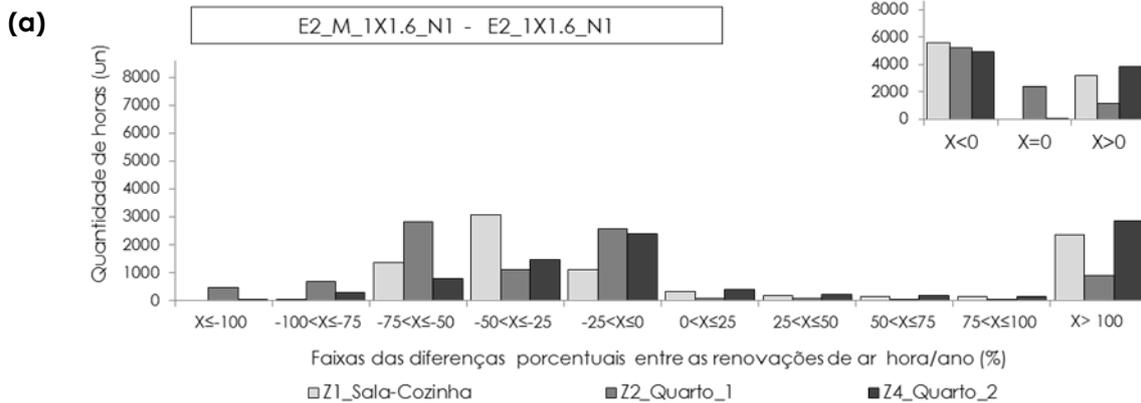
Quadro 18 - Diferenças nos Cps e nas taxas de renovações de ar dos casos com muro (RM) e sem (R), com tamanho de janela intermediária (1x1,6m).

Impacto nos Cps



Diferença entre os Cps por ângulo de incidência do vento do quarto 1 para os caso E2_M_1X1,6 – E2_1X1,6

Impacto no fluxo de ar



Faixas de diferença percentual das taxas de renovação de ar para todos os ambientes nas orientações N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste) dos casos (a) E2_M_1X1,6_N1 – E2_1X1,6_N1 e (b) E2_M_1X1,6_N2 – E2_1X1,6_N2, respectivamente.

Quadro 19 - Diferenças nos Cps e nas taxas de renovações de ar dos casos com varanda mais muro (E2) e com varanda só (E2), com tamanho de janela intermediária (1x1,6m).

Esse efeito predominante de redução do fluxo de ar se dá em relação às taxas de renovação obtidas para a habitação no clima em questão, que podem ser consideradas altas, conforme pode ser visto na Figura 73, referente aos casos sem muro (R), orientação N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste) com tamanho de janela de 1x1,6m. A média das máximas diárias das taxa de renovação de ar para o caso com janela intermediária (1x1,6m) na orientação N1 (Norte-Sul) foi de 49 ren/hora para a sala-cozinha, 127 para o quarto 1 e 100 para o quarto 2. Já para a orientação N2 (Leste-Oeste) foi de 14 ren/hora para sala-cozinha, 123 para o quarto 1 e 137 para o quarto 2. No período de março até agosto aproximadamente, os ambientes possuem as mais baixas renovações de ar, devido a velocidades de vento menores. Observou-se também que para a sala-cozinha na orientação N2 (Leste-Oeste) o fluxo de ar é menor por ser um ambiente com maior volume (proporcionalmente à área de abertura), e por estar na maior parte do ano a sotavento. Esses fluxos de ar foram diminuídos 13% em média para todos os ambientes aproximadamente da janela maior (1x2m) à janela intermediária (1x1,6m) e em 17% para a janela menor (1x1,2m) (em relação à janela intermediária).

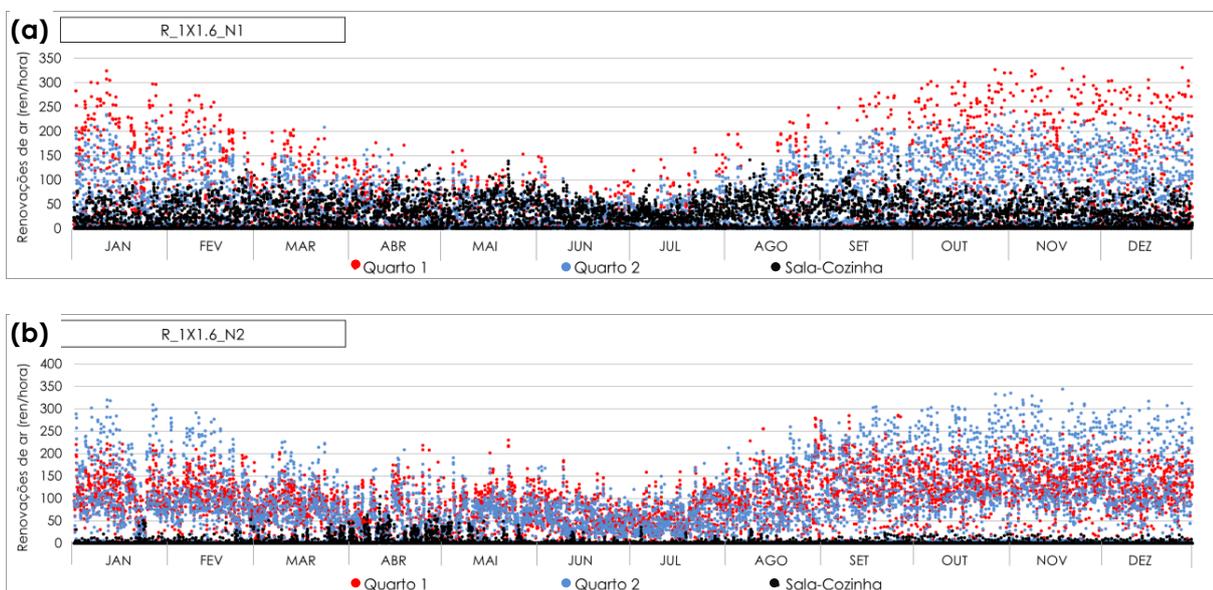


Figura 73 - Taxa de renovação de ar para todos ambientes durante um ano para os casos (a) R_1X1,6_N1 e (b) R_1X1,6_N2.

4.4.2. Sombreamento devido ao muro

O efeito de sombreamento do muro para os horários do mês de junho em ambas as orientações, é apresentado nas imagens a, b, c e d da Figura 93. Estas figuras demonstram que o muro consegue em certos períodos do dia gerar um sombreamento na edificação, para ambas as orientações. Estes períodos variam com a orientação da seguinte forma, na orientação N1 (Norte-Sul) a envoltória começa a ser sombreada antes das 07h30min e após das 15h30min aproximadamente. Para a orientação N2 (Leste-Oeste) antes das 08h30min e após das 15:00h aproximadamente. Destaque-se que para alguns horários este sombreamento consegue atingir parte das áreas de janela.

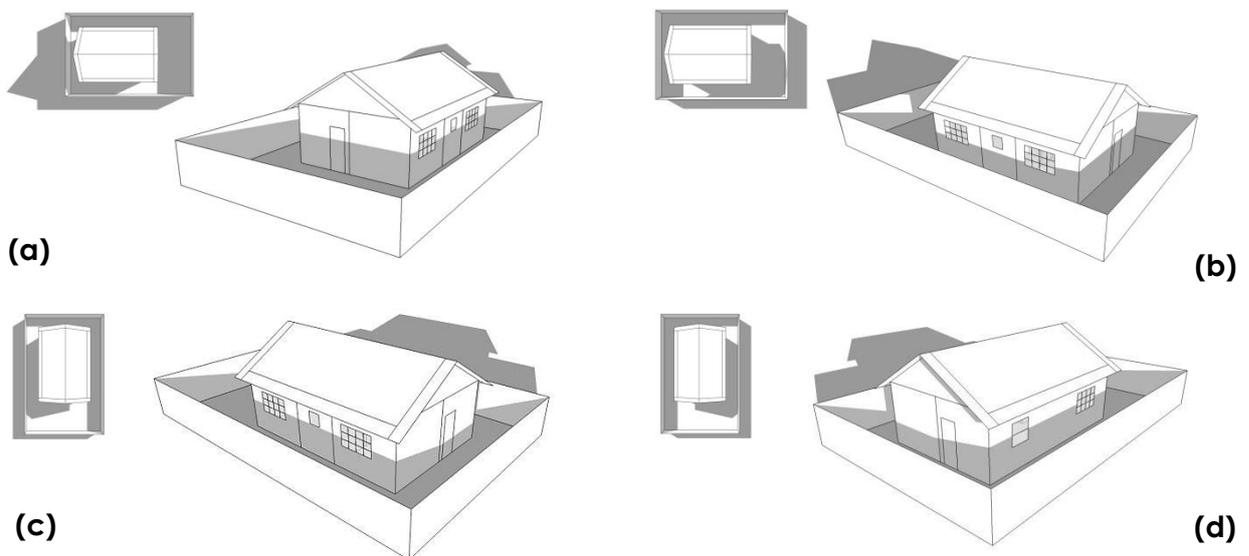


Figura 93 - Efeito de sombreamento do muro na edificação em junho para as orientações N1 (a) 6:30h; (b) 17:30h, e N2 (c) 6:30h; (d) 17:30h.

4.4.3. Impacto nas temperaturas internas do ar

Nas Figuras 94, 95, 96 e 97 tem-se as temperaturas interna e externa do ar do quarto 2, com valores médios horários para todos os meses do ano, bem como a diferença nas temperaturas internas referente aos casos com (RM) e sem (R) muro e com varanda (E2) e varanda mais muro (E2_M) nas orientações, N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste) e tamanho de janela intermediário (1X1,6m). Variações em relação

ao tamanho de janela e ambientes resultaram em padrões comportamentais similares.

Durante o período efetivo para a ventilação, o acréscimo do muro representou um aumento nas temperaturas internas. Isto como consequência da redução no fluxo de ar que este elemento proporciona nos ambientes (conforme o constatado no item 4.4.1.2). No entanto, foram identificados também períodos com redução das temperaturas internas. De acordo com o padrão de abertura das janelas identificado anteriormente, estas se fecham durante o dia. Desta forma, o decréscimo nas temperaturas internas obedece ao sombreamento que este elemento proporciona na envoltória da edificação (conforme foi mostrado no item 4.4.2) e possivelmente pela diminuição da taxa de infiltração.

Esse efeito também pode ser visto nos gráficos a,b,c e d que compõem a Figura 98 referentes aos mesmo casos. Nesta figura é apresentada a diferença horária entre as temperaturas internas do ar para os três ambientes pelo acréscimo do muro, dos casos com tamanho de janela intermediária (1x1,6m) para as duas orientações N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste), respectivamente.

Observa-se que, para mais da metade das horas no ano o fenômeno predominante pela inclusão do muro foi o aumento das temperaturas internas devido ao efeito que este elemento tem na ventilação noturna já mencionado anteriormente (item 4.4.1.2). Este aumento concentrou-se nas faixas de até 0,2°C para ambas as orientações. Quanto à diminuição das temperaturas internas as diferenças foram agrupadas maioritariamente na faixa de 0,1°C, sendo para todos os ambientes e orientações em parcelas menores quando comparadas com as que aumentam.

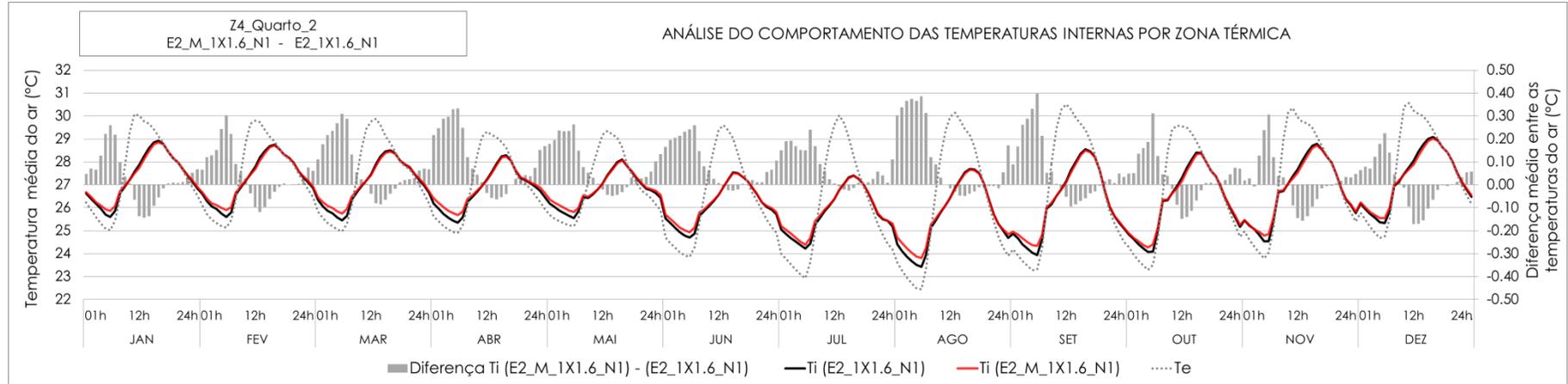


Figura 96 - Médias horárias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com varanda mais muro (E2_M_1X1,6_N1) e varanda (E2_1X1,6_N1) do quarto_2.

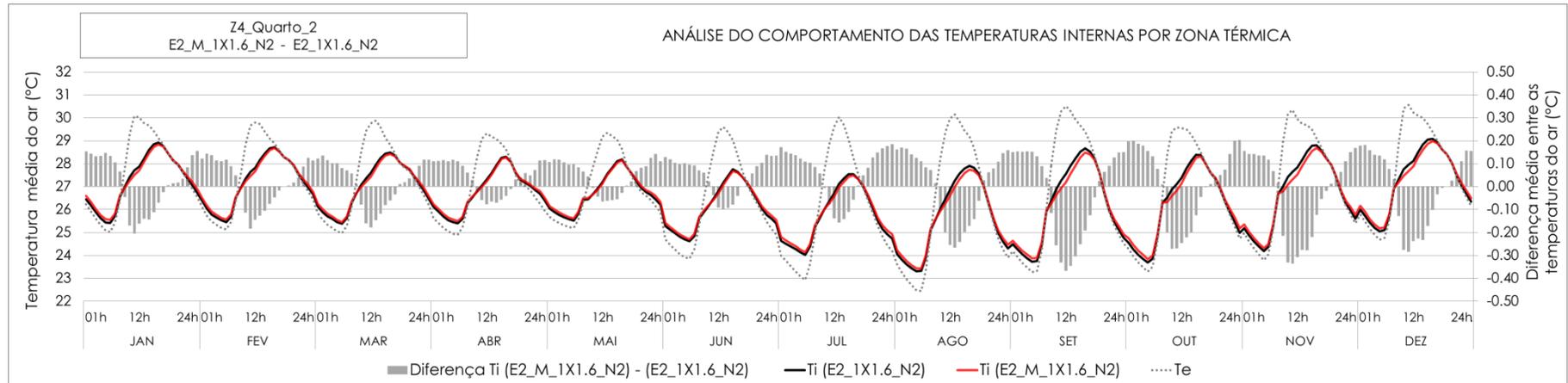


Figura 97 - Médias horárias para todos os meses do ano das temperaturas internas e sua diferença, referente aos casos com varanda mais muro (E2_M_1X1,6_N2) e varanda (E2_1X1,6_N2) do quarto_2.

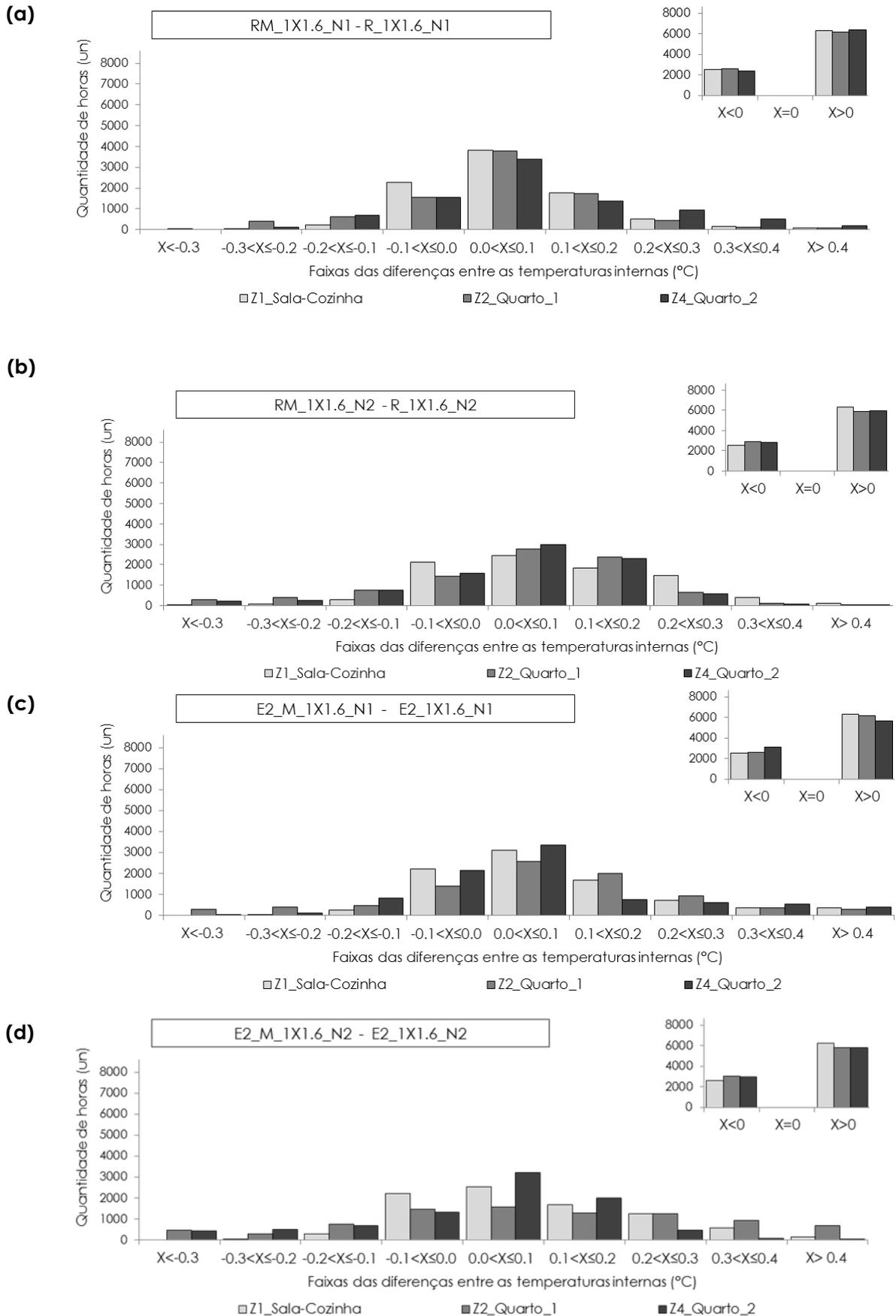


Figura 98 - Faixas de diferença entre as temperaturas internas do ar para os três ambientes dos casos: **(a)** RM_1X1,6_N1 - R_1X1,6_N1; **(b)** RM_1X1,6_N2 - R_1X1,6_N2; **(c)** E2_M_1X1,6_N1 - E2_1X1,6_N1; **(d)** E2_M_1X1,6_N2 - E2_1X1,6_N2.

4.5. Análises finais

As variações em tamanhos de janela para esta edificação não alteraram os valores de Cp (médios, em relação a todos os pontos medidos nas janelas). Por outro lado, os elementos externos à fachada alteraram os valores de Cp, e em função disso, foram observados os seus impactos tanto na ventilação natural, quanto no desempenho térmico da habitação. As grandezas destes impactos foram particulares para cada caso. O Quadro 20 apresenta o resumo dos principais impactos observados pela presença dos elementos estudados.

Casos	Impacto nos Cps	Orient.	Impacto nas Renovações de ar	Impacto nas temperaturas internas	Impacto (Ti) predominante
H1	↓ ↓	N1	↓ 25%	↓ ☀ ↑ ☾	↓ ☀ 0,1°C
		N2	↓ 25%	↓ ☀ ↑ ☾	↓ ☀ 0,2°C
H2	↓ ↓	N1	↓ 25%	↓ ☀ ↑ ☾	↓ ☀ 0,1°C
		N2	↓ 25%	↑ ☀ ↑ ☾	↑ ☾ 0,1°C
H3	↑ ↑	N1	↕ 25%	↓ ☀ ↓ ☾	↓ ☀ ☾ 0,1°C
		N2	↑ 25%	↓ ☀ ↓ ☾	↓ ☀ ☾ 0,1°C
E1	↓ ↓ ↑ ↑	N1	↑ 25%	↓ ☀ ↕ ☾	↓ ☀ 0,1°C
E2	↓ ↓		↓ 25%	↓ ☀ ↑ ☾	↓ ☀ 0,1°C
			↓ 25%	↓ ☀ ↑ ☾	↓ ☀ 0,3°C
RM	↓ ↓	N1	↓ 50%	↓ ☀ ↑ ☾	↑ ☾ 0,2°C
		N2	↓ 50%	↓ ☀ ↑ ☾	↑ ☾ 0,2°C
E2_M	↓ ↓	N1	↓ 75%	↓ ☀ ↑ ☾	↑ ☾ 0,2°C
		N2	↓ 75%	↓ ☀ ↑ ☾	↑ ☾ 0,2°C

↑ Aumento	↓ Diminuição	☀ Período diurno	☾ Período noturno	
↓ Sobrepessão	↑ Sobrepessão	↓ Sucção	↑ Sucção	↓ Inversão da sobrepessão

Quadro 20 - Resumo dos principais impactos nos Cps, na ventilação natural e nas temperaturas internas pela presença dos elementos estudados.

4.5.1. Impacto dos dispositivos de sombreamento horizontais e tipo “L”

As proteções horizontais básicas (H1) e afastadas (H2), na maioria dos ângulos de incidência do vento reduzem, em módulo, tanto as pressões positivas quanto as negativas (Quadros 13 e 14). Já com a proteção tipo veneziana (H3), é mais possível que ocorra o efeito oposto, por ela apresentar o efeito de aumento da sobrepressão ou da sucção na maior parte dos ângulos (Quadro 13). No entanto, essa é uma conclusão geral, pois, o impacto da proteção é estreitamente vinculado à direção do vento. Entre esses três casos, a proteção horizontal básica (H1) é a que apresentou a maior alteração no C_p .

Deste modo, o impacto nos C_p s foram refletidos no fluxo de ar dos ambientes. Em geral, o acréscimo destes elementos provocou uma diminuição da taxa de renovação de ar em torno de 25% na maior parte do ano (Quadros 13 e 14). Exceto nos casos com dispositivo tipo veneziana, nos quais foram observados para a orientação N2 (Leste-Oeste) um aumento da taxa de renovação de ar na faixa de até 25% para todos os ambientes, e também para a sala-cozinha na orientação N1 (Norte-Sul) (Quadro 15). Em relação às temperaturas internas, o efeito mais frequente foi o decréscimo destas no período diurno e o aumento no noturno, mas com diferenças menores (Quadro 20). Todavia, existiram casos com comportamentos diferenciados como foi o dispositivo afastado (H2) na orientação N2 (Leste-Oeste), que apresentou um aumento na temperatura (na faixa de 0 até 0,1°C) em mais horas do ano que a parcela que diminuiu (Figura 89), indicando sua pouca eficiência em evitar os ganhos por radiação solar direta nessa orientação. Por outro lado, o dispositivo horizontal básico (H1) na orientação N1 (Norte-Sul) (Figura 88) mesmo que se registrasse uma redução evidente das temperaturas do ar internas no período diurno, o impacto acentuado que este elemento teve nos C_p s, fez com que as temperaturas no período noturno aumentassem mais que as notadas para os outros dispositivos. Nos casos com dispositivos de sombreamento tipo veneziana (H3) (Figura 90), contrário ao observado para as outras proteções horizontais, o efeito predominante, foi o de redução das temperaturas internas, podendo ser consequência tanto do sombreamento quanto do aumento no fluxo de ar no período noturno, efeito observado para a maioria dos ambientes. Sendo deste modo, o dispositivo que apresentou melhor desempenho para as características da edificação, e clima estudados.

Para o dispositivo tipo "L" (E1) (Quadro 16), estudado somente para a orientação N1 (Norte-Sul), houve tanto o aumento, como a diminuição dos valores de C_p , dependendo do ângulo de incidência do vento. Esta geometria de dispositivo consegue modificar os ângulos nos quais ocorrem os efeitos de sobrepressão e sucção, quando comparado com o caso sem dispositivo (R). Este fenômeno observado nos C_p s foi refletido no desempenho da ventilação natural, mas com o efeito predominante de diminuição da taxa de renovação de ar concentrando-se em torno de 25% para os ambientes da sala-cozinha e o quarto1, exceto para o quarto 2, onde houve o efeito predominante de aumento dessa taxa em até 25%. Quanto às temperaturas internas (Figura 91), esta proteção contribuiu com a sua diminuição na maior parte das horas do ano no período diurno em todos os ambientes. Já no noturno foram distinguidas horas tanto com aumento quanto com diminuição, sendo a somatória total o efeito de aumento o mais dominante, para qualquer orientação.

4.5.2. Impacto da varanda

A inclusão da varanda ocasiona a redução, tanto da sobrepressão quanto da sucção (Figura 69), na maior parte dos ângulos de incidência do vento. Tais efeitos implicaram na redução do fluxo de ar em mais da metade do ano em até 25% (Figura 71 e 72). Isso ocorre no período de ventilação, que se dá desde o final da tarde até o início da manhã (período mais eficiente para a remoção de calor). Essa redução da ventilação natural causa uma pequena elevação da temperatura interna (entre 0,0 e 0,1°C) (Figuras 76 e 77). No entanto o fenômeno mais pronunciado foi o de redução do ganho de calor solar direto, derivado ao sombreamento feito pela varanda (Figura 75). Efeito esse que é refletido nos graus-hora de desconforto por calor, e de forma mais acentuada na orientação N2 (Leste-Oeste). Ou seja, para uma varanda dessas dimensões, as orientações N1 (Norte-Sul) e N2 (Leste-Oeste) apresentam níveis de conforto similares, sem prejuízo significativo da ventilação noturna.

4.5.3. Impacto do muro

Os muros de fechamento (RM e E2_M) foram os elementos que mais alteraram os valores de C_p (Quadros 18 e 19). Destaca-se o efeito de inversão da

sobrepressão como o mais predominante. Também foi constatada a diminuição que estes elementos ocasionam nos diferenciais de pressão entre janelas opostas para todos os ângulos de incidência do vento. Tais efeitos produziram uma redução do fluxo de ar em até 50% para o caso com muro (RM) e de até 75% para o caso com varanda mais muro (E2_M) (exceto a sala-cozinha na orientação N2). Tal efeito acarretou no período noturno um aumento na temperatura interna para a maior parte das horas do ano, para todos os ambientes e as duas orientações (Figuras 97 e 98). Portanto, o muro estudado limitou o potencial da ventilação natural em remover o excesso de calor nos períodos mais eficientes para esta acontecer. No período diurno, o muro contribuiu com a diminuição das temperaturas internas, pois, este elemento consegue sombrear a edificação em certos horários, embora em menor proporção quando comparado com os aumentos ocorridos nos períodos de ventilação.

5. CONCLUSÕES

No presente estudo foram avaliados os impactos que elementos externos à fachada têm na ventilação natural pela ação dos ventos e nas temperaturas interiores de uma habitação de interesse social térrea e isolada (ou seja, sem geminação), com 53,5m² de área total (sala e cozinha no mesmo ambiente, dois quartos e banheiro) localizada em Natal-RN. Os casos de estudo incluíram variadas geometrias de dispositivos de sombreamento (horizontais básica, afastada e veneziana, em L e varandas) e um muro localizado no perímetro do terreno. Para quantificar estes impactos foram realizados ensaios em túnel de vento de CLA e simulações computacionais no programa *EnergyPlus*, utilizando-se o módulo *AirflowNetwork*. Desta forma, e a partir das análises destes impactos foi possível concluir que:

- A variação no tamanho de janela não alterou a grandeza dos impactos observados pela presença dos elementos externos à fachada na habitação estudada.
- O período de ventilação indicado pela simulações computacionais para esta edificação no clima de Natal, foi desde o final do dia até o início da manhã (das 16 às 8hrs aproximadamente), invariável ante alterações como orientação, tamanho de janela, ou presença de elementos externos à fachada.
- Para os dispositivos horizontais básico (H1) e a varanda (E2) o impacto observado na maior parte dos ângulos de incidência foi a redução dos efeitos tanto de sobrepressão quanto de sucção. Isso se refletiu nas renovações de ar. A presença destes elementos provocou uma diminuição do fluxo de ar em torno de 25% e como consequência o aumento da temperatura no período noturno. No entanto, este incremento na temperatura é observado em menor quantidade de horas ao longo do ano quando comparado com a diminuição das temperaturas gerada pelo sombreamento. Os casos horizontal básico (H1) e varanda (E2) na orientação N2 (Leste-Oeste) contribuíram na diminuição das temperaturas internas no

período diurno, compensando os efeitos dessa orientação desfavorável do ponto de vista da insolação. Ou seja, o acréscimo dos dispositivos horizontal básico (H1) e da varanda (E2) sempre reduziu o desconforto total na habitação ao longo do ano, em qualquer orientação, devido ao sombreamento (apesar de uma pequena elevação, de até 0,1 °C na temperatura no período noturno, devido à redução da taxa de renovação).

- Para o dispositivo afastado (H2) o efeito foi similar ao identificado acima para os básicos e a varanda, no entanto, houve para a orientação N2 (Leste-Oeste) um aumento das temperaturas internas ao longo do ano de forma mais acentuada dentre os dispositivos horizontais estudados. Somente para a esta orientação o sombreamento não foi suficiente para superar o efeito de aumento de temperatura durante à noite, devido à redução da ventilação. Ou seja, as proteções solares horizontais afastadas só foram eficientes na orientação N1.
- O dispositivo de sombreamento tipo veneziana (H3) conseguiu para a maior parte dos ângulos de incidência do vento o aumento de sobrepressão ou da sucção. Fenômeno traduzido em um aumento das taxas de renovação de ar para a maioria dos ambientes, fazendo com que no período noturno se registraram em certos horários um decréscimo nas temperaturas internas. Convertendo-se no dispositivo que apresentou melhor desempenho térmico entre os dispositivos de sombreamento estudados, pois, as reduções nas temperaturas internas podem ocorrer tanto devido ao sombreamento, quanto graças ao aumento do fluxo de ar à noite.
- Para o dispositivo de proteção tipo "L" (E1), estudado somente para a orientação N1 (Norte-Sul), os resultados sobre o impacto no fluxo de ar apontaram um efeito predominante de redução nos ambientes da sala-cozinha e no quarto 1 e aumento no quarto 2. No período com ventilação noturna também foi evidenciado o impacto de diminuição da temperatura interna pelo aumento do fluxo de ar, no entanto, em menor proporção do efeito de aumento da temperatura nesse período. Mesmo com a elevação da temperatura no período noturno, devido à redução da taxa de

renovação, este fenômeno foi menor ao longo do ano quando comparado com o efeito de diminuição no período diurno. Ou seja, o acréscimo do dispositivo tipo L sempre reduziu o desconforto total na habitação ao longo do ano, nesta orientação, devido ao sombreamento.

- Os casos com muro foram entre todos os elementos estudados os que tiveram maior impacto nos Cps, sendo a inversão da sobrepressão o efeito mais evidente, o que significou que em todos os ângulos ocorreu sucção na envoltória. Tal fenômeno foi observado na diminuição da taxa de renovação de ar entre 50 e 75% para o caso com muro (RM) e o caso de varanda mais muro (E2_M) respectivamente. O impacto maior nas temperaturas internas foi o seu aumento no período noturno, limitando o potencial da ventilação natural na remoção de calor da edificação. Com isso, de forma contrária ao observado anteriormente para a maior parte das proteções solares, o acréscimo do muro no perímetro do terreno ocasiona o aumento do desconforto na habitação.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Como trabalhos futuros sugere-se:

- Avaliação do impacto de diversas geometrias de dispositivos de sombreamento e muros em modelos genéricos, concentrando-se no impacto dos coeficientes de pressão e nos parâmetros relativos à ventilação natural (taxas de renovação, direção, distribuição e velocidade do fluxo de ar), fazendo uso de simulações em programas CFD.
- Explorar o impacto dos diferentes tipos de dispositivos de sombreamento analisados no desempenho lumínico, conjuntamente com a ventilação natural e o desempenho térmico.
- Simulações similares em outros climas ou alterando os parâmetros relativos às aberturas.

- Estudo similar em edifícios multipavimentos.
- Avaliação do impacto de distintas configurações geométricas do entorno ao terreno nos coeficientes de pressão da envoltória.
- Tendo em vista o alto impacto observado das partições internas na redução do fluxo de ar na habitação estudada, estudo de alternativas de projeto que propiciem melhor ventilação cruzada.
- Como o coeficiente de pressão do vento é um dado de entrada essencial para o estudo de ventilação natural nos programas de desempenho termo energético, é necessário mais estudos acerca da modelagem de modelos/edificações com dispositivos de sombreamento nas aberturas, a fim de identificar o quão confiável é utilizar o coeficiente de pressão médio nestas situações.
- Verificação de possibilidades de simplificação na inserção dos coeficientes de pressão externos na modelagem dessas habitações em programas de simulação, tendo em conta o baixo impacto verificado nas temperaturas interiores, em alguns casos.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6123**: Forças devido aos ventos. Rio de Janeiro, 1988.

_____.**NBR 15220**. Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.

_____.**NBR 15220-2**. Desempenho térmico de edificações – parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005b.

_____.**NBR 15220-3**: Desempenho térmico de edificações – parte 3: zoneamento bioclimático Brasileiro e estratégias de condicionamento térmico passivo para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005c.

ACCIOLY, L.; OLIVEIRA, P.; BITTENCOURT, L. A influência da forma de prateleiras de luz na captação e distribuição interna da ventilação natural em um ambiente. **XVI Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, p. 417–427, 2016.

ANCHIETA, C. **Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of solar incidence and shading devices**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Arquitetura e Urbanismo, IAU/USP. São Carlos, SP, 2016.

ASCE-AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS. **Wind tunnel studies of buildings and structures**. Reston, Virginia: American Society of Civil Engineer, 1999.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIRCONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE. **ASHRAE Standard 55 – 2013**. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 2013.

_____.**ASHRAE Standard 140 – 2004**. Standard method of test for the evaluation of building energy analysis computer programs. American Society of Heating, Refrigerating and Air- Conditioning Engineers, Inc. Atlanta, 2004.

AUTODESK. **Autocad ® 2014**. 2014.

AYAD, S. S. Computational study of natural ventilation. **Journal of wind engineering and industrial aerodynamics**, v. 82, p. 49–68, 1999.

AZZI PITTA, J. A. **Ações devidas ao vento em edificações**. 1ª edição. São Carlos: EdUFCar, 2015.

BARLOW, J. B.; RAE, W. H.; POPE, A. **Low-speed wind tunnel testing**. 3ª edição ed. John Wiley & Sons, 1999.

BITTENCOURT, L.; SACRAMENTO, A.; CÂNDIDO, C.; LEAL, T. Estudo do desempenho do peitoril ventilado para aumentar a ventilação natural em escolas de Maceió/AL. **Ambiente Construído**, v. 7, n. 3, p. 59–69, 2007.

BITTENCOURT, L.; BIANA, G.; CRUZ, J. M. Efeito de protetores solares verticais e horizontais na ventilação natural de salas de aula do 2º grau. **III Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído ENCAC e I Encontro Latino-Americano de Conforto no Ambiente Construído ELACAC**, p. 383–389, 1995.

BLESSMANN, J. The Boundary Layer TV-2 Wind Tunnel of the UFRGS. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 10, p. 231–248, 1982.

CÂNDIDO, C. ; BITTENCOURT, L.; de DEAR, R. J.; LAMBERTS, R. Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. **Building and Environment**, v. 45, n. 1, p. 222–229, 2010.

CÂNDIDO, C.; BITTENCOURT, L. **Introdução a ventilação natural**. 3ª edição ed. Maceió: EDUFAL, 2008.

CERMAK, J. E.; POREH, M.; PETERKA, J.; AYAD, S. Wind tunnel investigations of natural ventilation. **Journal of Transportation Engineering**, v. 110, n. 1, p. 67–79, 1984.

CHAM LIMITED. **CHAM PHOENICS**. Disponível em: <<http://www.cham.co.uk/>>. Acesso em: 9 maio. 2016.

CHAND, I.; BHARGAVA, P. K.; KRISHAK, N. L. V. Effect of balconies on ventilation inducing aeromotive force on low-rise buildings. **Building and Environment**, v. 33, n. 6, p. 385–396, 1998.

CHAND, I.; KRISHAK, N. L. V. Laboratory studies of the effect of louvers on room air motion. **Building Science**, v. 6, n. 4, p. 247–252, 1971.

CHANG, W. R. Effect of porous hedge on cross ventilation of a residential building. **Building and Environment**, v. 41, n. 5, p. 549–556, 2006.

CHANG, W. R.; CHENG, C. L. Modulation of cross ventilation in a residential building using a porous hedge. **Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers**, v. 30, p. 409,417, 2009.

CÓSTOLA, D.; BLOCKEN, B.; OHBA, M.; HENSEN, J.L.M. Uncertainty in airflow rate calculations due to the use of surface-averaged pressure coefficients. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 6, p. 881–888, 2010.

CÓSTOLA, D.; BLOCKEN, B.; HENSEN, J. L. M. Overview of pressure coefficient data in building energy simulation and airflow network programs. **Building and Environment**, v. 44, n. 10, p. 2027–2036, 2009.

COUNIHAN, J. An improved method of simulating an atmospheric boundary layer in a wind tunnel. **Atmospheric Environment**, v. 3, p. 197–214, 1969.

DEAR, R. J. DE; G.S. BRAGER. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: revision to ASHRAE standards 55. **Journal of Energy and Buildings**, v. 34, p. 549–561, 2002.

DORNELLES, K. A. **Absortância solar de superfícies opacas: Métodos de determinação e base de dados para tintas acrílica e PVA**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2008.

EERE - DEPARTMENT OF ENERGY EFFICIENCY AND RENEWABLE ENERGY. **EnergyPlus. Version 8.1** US: Department of Energy Efficiency and Renewable. Disponível em: <<https://energyplus.net/>>. Acesso em: 31 jul. 2016.

FAVRETTO, A. P. **Regression Models to asses thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of opaque envelope**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Arquitetura e Urbanismo, IAU/USP. São Carlos, SP, 2016.

FISK, W. J.; ROSENFELD, A. H. Estimates of Improved Productivity and Health from Better Indoor Environments. **Indoor Air**, v. 7, n. 3, p. 158–172, 1997.

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 5ª edição ed. São Paulo: Studio Nobel, 2001.

GIVONI, B. **Man, climate, and architecture**. 2ª edição. Londres: Elsevier Science Ltd, 1976.

GIVONI, B. **Comfort, climate analysis and building design guidelines**. Energy and Buildings, 1992.

GROSSO, M. **User's Manual CPCALC+**. Turin: Commission of the European Communities Directorate General for Science, Research & Development, 1995.

HIEN, W. N.; ISTIADJI, A. D. Effects of external shading devices on daylighting and natural ventilation. **Eighth International IBPSA Conference Eindhoven, Netherlands**, p. 475–482, 2003.

HOLMES, J. D. **Wind Loading of Structures**. 2ª edição. CRC Press Taylor & Francis Group, 2015.

INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL (INMETRO). **RTQ-R: Regulamento técnico da qualidade para o nível de eficiência energética edificações residenciais**. Rio de Janeiro, 2012.

IPT - INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS. **IPT de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.ipt.br>>. Acesso em: 13 junho 2016.

IRWIN, H. P. A. H. The design of spires for wind simulation. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 7, n. 3, p. 361–366, 1981.

JEFFE, A. P.; WESTPHAL, F. S. Desempenho térmico de um ambiente corporativo naturalmente ventilado em Florianópolis, SC. **Encuento Nacional de Tecnologia do Ambiente Construido ENTAC**, nov. 2014.

KINDANGEN, J.; KRAUSS, G.; DEPECKER, P. Effects of roof shapes on wind-induced air motion inside buildings. **Building and Environment**, v. 32, n. 1, p. 1–11, 1997.

KIRIMTAT, A.; Koyunbaba, B. K.; Chatzikonstantinou, I.; Sariyildiz, S. Review of simulation modeling for shading devices in buildings. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 23–49, 2016.

KOWALTOWSKI, D. K. et al. **O processo de projeto em arquitetura: Da teoria à tecnologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

LABEEE-Laboratório de Eficiência Energética em Edificações. **Arquivos climáticos INMET 2015**. Disponível em: <<http://www.labee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos/inmet2015>>. Acesso em: 12 jul. 2016.

LI, W.; WANG, F.; BELL, S. Simulating the sheltering effects of windbreaks in urban outdoor open space. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 95, n. 7, p. 533–549, 2007.

LIU, Y.; HARRIS, D. J. Effects of shelterbelt trees on reducing heating-energy consumption of office buildings in Scotland. **Applied Energy**, v. 85, n. 2–3, p. 115–127, 2008.

LOREDO-SOUZA, A. M.; CAMAÑO, B. E.; PALUCH, M. J. Simulação da camada limite atmosférica em túnel de vento. **IV Escola Primavera de Transição e Turbulência**, v. IV, 2004.

LUKIANCHUKI, M. A. **A evolução das estratégias de iluminação natural nos hospitais Sarah de Salvador e do Rio de Janeiro**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Arquitetura e Urbanismo, IAU/USP. São Carlos, SP, 2010.

MALARD, M. L.; CONTI, A.; SOUZA, R. C.; COMPOMORI, M.J. Avaliação pós-ocupação, participação de usuários e melhoria de qualidade de projetos habitacionais: uma abordagem fenomenológica. **Coletânea Habitare**, v. Vol 1, p. Belo Horizonte, 2002.

MARQUES, T. H. T. **Influência propriedades térmicas envolvente opaca desempenho habitações interesse social em São Carlos SP**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Arquitetura e Urbanismo, IAU/USP. São Carlos, SP, 2013.

MARUTA, E.; KANDA, M.; SATO, J. Effects on surface roughness for wind pressure on glass and cladding of buildings. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 74–76, p. 651–663, 1998.

MENDES, N.; WESTPHAL, F. S.; LAMBERTS, R.; NETO, J. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil. **Ambiente Construído**, p. 47–68, 2005.

MICROSOFT. **Microsoft Excel**, 2010.

MONTAZERI, H.; BLOCKEN, B. CFD simulation of wind-induced pressure coefficients on buildings with and without balconies: Validation and sensitivity analysis. **Building and Environment**, v. 60, p. 137–149, 2013.

NICOL, F. Adaptive thermal comfort standards in the hot-humid tropics. **Energy and Buildings**, v. 36, p. 628–637, 2004.

NÚÑEZ, G. J. Z.; LOREDO-SOUZA, A. M.; ROCHA, M. M. Uso do túnel de vento como ferramenta de projeto no design aerodinâmico. **Design e Tecnologia**, v. 4, p. 1–23, 2009.

OLGYAY, V. **Arquitectura y clima: manual de diseño bioclimático para arquitectos y urbanistas**. Barcelona: Gustavo Gili, 1998.

OLIVA, C.; CELANI, M. G. Ventilação e sustentabilidade: uso de maquetes para avaliação da ventilação natural no processo de projeto. **XXII congresso de iniciação**, 2008.

PEREIRA, H. A. C. P.; MELO, A.P.; SORGATO, M. J.; VERSAGE, R.; MATOS, M.; LAMBERTS, R. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa EnergyPlus – Versão 8.0**. Florianópolis, 2013.

PERÉN, J.I.; VAN HOOFF, T; LEITE, B.C.C; BLOCKEN, B. Impact of eaves on cross-ventilation of a generic isolated leeward sawtooth roof building: Windward eaves, leeward eaves and eaves inclination. **Building and Environment**, v.92, p. 578-590, 2015.

PRATA-SHIMOMURA, A. R.; CELANI, G.; FROTA, A. B. Construção de modelos físicos para análise da ventilação natural em túnel de vento. **XI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído ENCAC VII e Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído ELACAC.**, n. 1, p. 1–9, 2011.

PRATA, A. **Impacto da altura de edifícios nas condições de ventilação natural do meio urbano**. Tese de Doutorado. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

PRIANTO, E.; DEPECKER, P. Characteristic of airflow as the effect of balcony, opening design and internal division on indoor velocity: A case study of traditional dwelling in urban living quarter in tropical humid region. **Energy and Buildings**, v. 34, n. 4, p. 401–409, 2002.

QUAN, Y.; TAMURA, Y.; MATSUI, M.; CAO, S.; YOSHIDA, A. TPU aerodynamic database for low-rise buildings. **12th International Conference on Wind Engineering**, 2007.

RORIZ, M. **Base de dados climáticos de 411 municípios brasileiros**. Arquivos em formato de EPW (Energyplus Weather Data). Disponível em: <http://www.roriz.eng.br/epw_9.html>. Acesso em: 15 setembro 2016.

RORIZ, V. F.; RORIZ, M. **CataVento**, 2015a.

RORIZ, V. F.; RORIZ, M. **EPvieW**, 2015b.

ROSSI, M. M. **Regression models to assess the thermal performance of Brazilian low-cost houses: consideration of natural ventilation**. Dissertação de Mestrado. Instituto de Arquitetura e Urbanismo, IAU/USP. São Carlos, SP, 2016.

SANTAMOURIS, M. **Advances in passive cooling**. London: Earthscan, 2007.

SANTAMOURIS, M.; ALLARD, F. **Natural ventilation in buildings: a design handbook**. London: James & James Science Publishers, 1998.

SANTAMOURIS, M.; WOUTERS, P. **Building ventilation: the state of the art**. ilustrada ed. UK: Earthscan, 2006.

SCHNEIDER, P. S. **Medição de velocidade e vazão de fluidos**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2011.

SMITH, E. G. **The feasibility of using models for predetermining natural ventilation**. Texas: Texas Engineering Experiment Station, 1951.

SORGATO, M. J. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Florianópolis, 2009.

SORGATO, M. J. **Relatório técnico da base de simulações para o RTQ-R**. Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Florianópolis, 2011.

SPITLER, J. D.; XIAO, D.; REES, S. J. An analytical verification test suite for multi-zone building fabric and control models in whole building energy simulation programs. **Proceedings of the eSim 2002 Conference**, p. 260–267, 2002.

STATHOPOULOS, T.; ZHU, X. Wind pressures on buildings with appurtenances. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 31, p. 265–281, 1988.

STREET, B. T. H. E.; COMMUNITIES, I. N. G. Entre a rua e o muro: a construção de uma interface nos condomínios. **Paisagem e ambiente: ensaios N. 37**, p. 35–49, 2016.

SWAMI, M. V.; CHANDRA, S. Correlations for pressure distribution on buildings and calculation of natural-ventilation airflow. **ASHRAE transactions**, v. 94, n. 3112, p. 243–266, 1988.

SZOKOLAY, S. V. **Introduction to architectural science the basis of sustainable design**. London: Elsevier Science, 2004.

TOKYO POLYTECHNIC UNIVERSITY. **Aerodynamic database for low-rise buildings**. Disponível em: <http://www.wind.arch.t-kougei.ac.jp/info_center/windpressure/lowrise/Introductionofthedatabase.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2016.

TOLEDO, A. A Contribuição da orientação e do sombreamento na composição das cargas e no consumo final de energia. **Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído ENCAC.**, p. 905–912, 2003.

TOLEDO, E. **Ventilação Natural das Habitações**. 1ª edição. Maceió: EDUFAL, 1999.

TRAMONTANO, M.; SANTOS, D. M. Atrás dos muros. **Congresso internacional el habitar 2**, Buenos Aires, 2003.

WANG, F. Modelling sheltering effects of trees on reducing space heating in office buildings in a windy city. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 12, p. 1443–1454, 2006.

WITWER, A. R.; MÖLLER, S. V. Characteristics of the low-speed wind tunnel of the UNNE. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 84, n. 3, p. 307–320, 2000.

YARKE, E. **Ventilación natural de edificios: Fundamentos y métodos de cálculo para aplicación de ingenieros y arquitectos**. 1ª edição. Buenos Aires: Nobuko, 2005.