

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO - FAU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO
DOUTORADO CIDADES

TESE DE DOUTORADO

VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS:

parâmetros normativos para configuração das aberturas.

Isabela Cristina Da Silva Passos Tibúrcio

Maceió, outubro de 2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS – UFAL
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO - FAU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO
DOUTORADO CIDADES

Isabela Cristina Da Silva Passos Tibúrcio

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Federal de Alagoas, como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Doutor em Arquitetura e Urbanismo.

VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS:

parâmetros normativos para configuração das aberturas.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Salazar Bittencourt
Linha de Pesquisa: Tecnologias

Maceió, outubro de 2017

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central

Bibliotecária Responsável: Janaina Xisto de Barros Lima

T552v Tibúrcio, Isabela Cristina da Silva Passos.
Ventilação natural em edificações residenciais : parâmetros normativos para configuração das aberturas/ Isabela Cristina da Silva Passos. – Maceió, 2018.
204. : il.

Orientador: Leonardo Salazar Bittencourt.
Tese (doutorado em Arquitetura e Urbanismo : Dinâmicas do Espaço Habitado) – Universidade Federal de Alagoas. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Maceió, 2017.

Bibliografia: f. 143-152.
Anexos: f. 153-204.

1. Edificações residenciais multifamiliares. 2. Ventilação natural. 3. Aberturas.
I. Título.

CDU: 728.2: 697.921.2

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
FACULDADE DE ARQUITETURA E URBANISMO - FAU
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO
DOUTORADO CIDADES

Isabela Cristina Da Silva Passos Tibúrcio

VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES RESIDENCIAIS:

parâmetros normativos para configuração das aberturas.

Tese aprovada em 27 de outubro de 2017.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Leonardo Salazar Bittencourt

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFAL (ORIENTADOR)



Prof.ª Dr.ª Gianna Melo Barbirato

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFAL (MEMBRO INTERNO)



Prof.ª Dr.ª Juliana Oliveira Batista

Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – UFAL (MEMBRO INTERNO)



Prof. Dr. Aldomar Pedrini

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN (MEMBRO EXTERNO)



Prof.ª Dr.ª Christhina Maria Cândido

University of Sydney - Australia (MEMBRO EXTERNO)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por me permitir chegar até aqui, por me inspirar sonhos que nem eu imaginava conseguir conquistar e por me capacitar com tua graça e fortaleza: Obrigada, Senhor! À Nossa Senhora por sua intercessão e cuidado comigo e minha família.

Ao Pablo, meu companheiro em todos os momentos, por me amar, entender, incentivar e impulsionar. Por ser uma das pessoas que mais contribuiu para esta tese mesmo sem ser da área, com suas críticas e sugestões sempre pertinentes. Muito obrigada por tudo! À minha filhinha Alice que chegou no meio dessa trajetória e a transformou em uma jornada bem mais leve e plena de amor, embora repleta de pausas.

À minha família amada pelo incentivo e principalmente pela ajuda com Alice. Um agradecimento muito especial a algumas mulheres que foram minha rede de apoio nesse processo: a minha mãe Lúcia, carinhosamente apelidada de vovó Lulú, sem a qual a escrita desta tese seria impossível. E à Marinécia, Ingrid, Ana Hortência e Liliane pelo carinho e cuidado com nossa pequena.

Aos amigos-irmãos do Grupo de Oração Água Viva pelas orações constantes e compreensão nas inúmeras ausências, em especial ao Gil e à Paula por estarem sempre perto. Aos meus colegas de turma, Ana Cláudia, Daniel, Flávia, Fernando, Marcos, Marcelle, Tainá e Viviane pela companhia nas disciplinas e apoio mútuo nesses quatro anos de muito trabalho e sete filhos (pelo menos por enquanto).

Às amigas: Eveline Athayde, Adriana Guimarães, Carol Gonçalves, Emanuela Montoni e Carlina Rocha pela convivência diária no trabalho, compreensão, paciência e incentivo, sempre presentes em nossas conversas e cafezinhos no CESMAC e fora dele. Avante, meninas, avante! Em breve seremos todas doutoras.

Aos amigos Alexandre Sacramento e Melyna Lamenha por compartilharem seu vasto conhecimento e experiências com o PHOENICS e por tamanha ajuda no início dos trabalhos com o software. Desvendar essa ferramenta não foi fácil e vocês foram essenciais neste processo.

Ao meu orientador, Leonardo Bitencourt, pela atenção e disponibilidade e aos demais membros da banca: Gianna Barbirato, Juliana Batista, Christhina Candido e Aldomar Pedrini pelas valiosas contribuições ao meu trabalho.

Ao Marcos Soares pela ajuda na elaboração de algumas das imagens que ilustram a tese, a Livia Martins pela contribuição com a logo do Brisa e ao Samuel Morrissey pelo desenvolvimento do aplicativo.

A CAPES pelo auxílio financeiro.

Por fim, gostaria de agradecer ao GECA – Grupo de Estudos em Conforto Ambiental, em especial nas pessoas de Gianna e Leo, que dão total liberdade aos pesquisadores que dele fazem parte, oferecendo assim, a oportunidade de viver experiências de crescimento profissional e pessoal. Sou muito grata por tudo que vivi aqui, no GECA – UFAL, e levarei comigo todos os conhecimentos adquiridos ao longo desses dez anos.

A Alice que, com seu amor, tem me ensinado
muito mais do que tudo que vivi antes da sua
chegada.

“É nEle que toda construção se ajusta e se
eleva...” Ef 2, 21

RESUMO

A ventilação natural é um dos principais fenômenos que afetam a sensação de conforto térmico em regiões de clima tropical. Sua utilização como estratégia bioclimática pode significar uma importante economia de energia com sistemas de condicionamento de ar. Entretanto, as recomendações normativas em vigor são incompletas e divergentes quanto ao uso da ventilação natural nas edificações. O presente trabalho buscou identificar parâmetros de configuração das aberturas que possam ser incorporados às Normas Brasileiras de desempenho para uma melhor orientação aos projetistas. Para isto foram realizadas análises paramétricas através de simulações computacionais com o *software* PHOENICS VR 3.6.1 que é um programa CFD – Dinâmica dos Fluidos Computacional. Foi escolhido um modelo de edificação multifamiliar residencial representativo dentre as tipologias existentes no Brasil, que possibilitou a simulação de diferentes configurações de aberturas variando o dimensionamento das aberturas de entrada e saída, a porosidade das portas internas e a orientação em relação aos ângulos de incidência dos ventos. As simulações foram realizadas considerando a velocidade externa do ar igual a 2m/s e 3m/s, que correspondem aos valores médios mais frequentes nas capitais brasileiras. As modificações realizadas resultaram num total de 26 modelos simulados e em cada um deles foram considerados abertos todos os ambientes do pavimento térreo e do terceiro pavimento. Em geral, os modelos com maior área de abertura e maior porosidade da porta obtiveram maiores valores de velocidade interna, sendo que os modelos com o vento incidindo a 135° tiveram uma distribuição mais uniforme no interior dos apartamentos. O modelo que apresentou maior frequência de velocidades médias internas acima de 0,4m/s foi o modelo com 25% de área de abertura em relação à área do piso, 100% de porosidade das portas internas e 48% de área de abertura de saída em relação à área de abertura de entrada na unidade habitacional. Os resultados mostraram a forte influência do dimensionamento das aberturas, da porosidade das portas internas e da orientação no desempenho da ventilação natural, levando a crer que só o dimensionamento das aberturas de entrada não é suficiente para proporcionar um desempenho satisfatório da ventilação natural em edificações residenciais. Foram elaboradas recomendações para a configuração das aberturas em edificações residenciais brasileiras de acordo com a Zona Bioclimática da qual fazem parte. Sugere-se que as recomendações normativas sejam revistas considerando os resultados encontrados nesta tese.

ABSTRACT

Natural ventilation is one of the main phenomena that affect thermal comfort in tropical climate regions. Its use as a bioclimatic strategy can mean energy saving with air conditioning systems. However, the normative recommendations in Brazil are incomplete and divergent, in relation to natural ventilation in buildings use. The majority of them refers only to the entrance opening area, relating it to the floor area, showing the lack of a standard that consider, in an integrated way, openings dimension and others important aspects that affect natural ventilation in buildings. The present work sought to identify parameters of openings configuration that can be incorporated into the Brazilian Standards for a better orientation to the designers. Parametric analyzes were performed with Computational Fluid Dynamics (CFD) modeling through the PHOENICS VR 3.6.1 program. A representative model of a multifamily residential building was chosen which allowed the simulation of several variables that influence natural ventilation performance. This model was adapted with different configurations of openings by varying the size of inlet and outlet openings, the porosity of internal doors and the orientation in relation to external winds. The modifications made resulted in a total of 26 simulated models which in each of them were considered open all rooms of ground floor and third floor. Initially, the models were simulated with external air velocity of 2m/s, which was the average between Brazilian capitals, as well as the most frequent average value. After that, the best and the worst cases were simulated using the external air velocity of 3m/s, in order to compare them. The results were divided into qualitative and quantitative data. In general, the models with greater opening area and greater door porosity obtained greater results of internal air speed, being that the models with the wind incident to 135 ° had a more uniform distribution between the apartments. The model with the highest frequency of internal velocities above 0,4 m/s was the model with 25% opening area in relation to the floor area, 100% porosity of the internal doors and 48% of outlet opening area in relation to the inlet opening area in the apartment. The results showed the strong influence of openings design, internal doors porosity and orientation in the natural ventilation performance, leading to believe that only the size of the entrance openings is not sufficient to provide a satisfactory natural ventilation performance in residential buildings. Recommendations for windows configuration in residential building in Brazil were elaborated according to the Bioclimatic Zoning. It is suggested that the normative recommendations be reviewed considering the recommendations made in this thesis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Principais temas do trabalho.	30
Figura 2 – Carta Bioclimática para climas quentes.	34
Figura 3 – Carta Bioclimática de Givoni para Porto Alegre-RS e Belém-PA, respectivamente.	35
Figura 4 – Escala de conforto de Fanger (PMV/PPD).	36
Figura 5 – Modelo adaptativo de conforto.	37
Figura 6 - Velocidade média do ar interno em relação ao vento externo (%) em função da relação entre as aberturas de entrada e saída do ar, para incidências do vento a 45° e 90°.	38
Figura 7 – Distribuição do fluxo de ar conforme o tamanho das aberturas.....	39
Figura 8 – Efeito da forma das aberturas em função da incidência do vento.....	40
Figura 9 – Efeito da localização das aberturas numa edificação térrea.	42
Figura 10 – A influência da localização das aberturas no padrão do escoamento da ventilação natural nos ambientes.	46
Figura 11 – Distribuição do fluxo de ar no arranjo construtivo para o vento Sudeste. ...	48
Figura 12 – Edificação residencial de 30 pavimentos, típica de Hong Kong.....	48
Figura 13 – Efeito da escolha de diferentes tipologias de esquadrias no desempenho da ventilação natural em escritórios.	50
Figura 14 – Modelo original utilizado por Costa (2009).....	52
Figura 15 – Diferentes configurações das aberturas simuladas por Cunha (2010): pequena (1,25m ²), média (2,0m ²) e grande (4,0m ²).	53
Figura 16 – Modelo utilizado por Sacramento (2012) em sua pesquisa: planta baixa e perspectiva mostrando os pavimentos analisados.	54
Figura 17 - Planta baixa do pavimento 1 com vento a 90°. Na imagem com abertura com 10% da área do piso e na segunda com 25% da seção média (a pior e a melhor situação simulada).	55
Figura 18 – Tipologias avaliadas por Morais em sua tese de doutorado.....	56

Figura 19 – Escala cromática de velocidades do ar em relação ao conforto térmico dos usuários segundo Candido (2010).	57
Figura 20 – Habitação tradicional na Malásia e programa de habitação do governo.....	58
Figura 21 – Imagens das simulações realizadas em duas edificações tradicionais e na proposta pelo governo para habitação popular.....	58
Figura 22 – Proposta dos autores para residência na Malásia.	59
Figura 23 – Variações na inclinação do telhado simuladas por Péren et al(2015).....	59
Figura 24 – Resultados das simulações com cinco inclinações de telhados diferentes. A partir de 18° aumenta o volume de ar no ambiente conforme aumenta a inclinação.	60
Figura 25 – Variações de localização da abertura de saída simuladas e parte dos resultados das simulações em CFD.....	60
Figura 26 – Edifício analisado por Elshafei <i>et al</i> (2017) e protetores acrescentados ao às janelas do modelo.	61
Figura 27 – Situação dos regulamentos de eficiência energética em 80 países analisados.	64
Figura 28 – Recomendações acerca das aberturas para residências australianas.....	66
Figura 29 – Velocidade do ar necessária para expandir os limites para temperaturas aceitáveis.	68
Figura 30 – Variação aceitável de temperaturas operativas a velocidades do ar para a zona de conforto, para uma razão de umidade de 0,010.....	74
Figura 31 – Esquema ilustrativo das etapas metodológicas do trabalho.	77
Figura 34 – Planta baixa apresentada por Triana (2015), escolhida para o desenvolvimento desta tese à esquerda. À direita, planta baixa analisada por Morais (2013).....	79
Figura 35 – Perspectivas do modelo escolhido para as análises.....	80
Figura 36- Modelos construídos no <i>SketchUp</i> com 8, 12, 25 e 40% de área de abertura.	85
Figura 32 – Diferentes porosidades da porta de acesso aos ambientes, onde a parte hachurada em cinza corresponde à área considerada vazada nas simulações.....	87
Figura 33– Incidências de vento em relação ao eixo Y, consideradas nas simulações. .	88
Figura 37 – Etapas de simulação no programa CFD PHOENICS.	91

Figura 38 – Gradiente de vento determinado no programa por meio da configuração do objeto WIND, com destaque para o gradiente de vento.	93
Figura 39 – Domínio calculado, representado pelo WIND, com o modelo ao centro. ..	94
Figura 40 – Malha configurada no software PHOENICS para o modelo em planta baixa.	95
Figura 41 - Malha configurada no software PHOENICS para o modelo em vista, com espaçamento exponencial das células.	95
Figura 42 – Gráfico de erros e <i>spot values</i> da simulação de modelo com 25% de área de abertura em relação á área de piso e incidência de vento 90°.	96
Figura 43 – Plano definido para sala do apartamento C a 1,5m de altura do piso.	97
Figura 44 – Alturas em relação ao solo, onde foram analisadas as velocidades do ar internas.	98
Figura 45 – Localização do <i>probe</i> onde se registrou o valor de referência da velocidade do ar externa.	99
Figura 46 – Valores mínimos para velocidade do ar com 80 e 90% de aceitabilidade.	101
Figura 51 – Gráfico de velocidade médias do ar no apartamento A no modelo com 8% de área de abertura, simulado com duas velocidades de vento externo; 2 e 3 m/s.	112
Figura 52 - Gráfico de velocidade médias do ar no apartamento A no modelo com 40% de área de abertura, simulado com duas velocidades de vento externo; 2 e 3 m/s.	112
Figura 47 – Incidências de vento analisadas e os apartamentos privilegiados em cada caso.	113
Figura 48- Gráfico da velocidade do ar para incidência 0° no apartamento A.	114
Figura 49- Gráfico da velocidade do ar para incidência 90° no apartamento A.	114
Figura 50 – Gráfico da velocidade do ar para incidência 135° no apartamento A.	115
Figura 53 – Valores de velocidade máxima encontrados nas alturas investigadas.	119
Figura 54 – Gráfico de velocidades do ar para os três tipos de porosidade das portas a 1,5m do chão.	120
Figura 55 – Gráfico de velocidades do ar para os três tipos de porosidade das portas a 0,6m do chão.	121

Figura 56 – Coeficiente de velocidade com vento a 135°	122
Figura 57 – Velocidades médias internas em relação à velocidade ao ar externo a 135° no térreo: 25% e 40% de área de abertura em relação à área de piso.....	123
Figura 58 – Velocidades médias internas em relação à velocidade ao ar externo a 135° no 3° pavimento: 25% e 40% de área de abertura em relação à área de piso.	123
Figura 59 - Coeficiente de velocidade com vento a 90°	124
Figura 60 - Velocidades médias internas em relação à velocidade ao ar externo a 90° no térreo: 25% e 40% de área de abertura em relação à área de piso.....	124
Figura 61 - Velocidades médias internas em relação à velocidade ao ar externo a 0° no térreo e 3° pavimento: 40% de área de abertura em relação à área de piso.	125
Figura 62 – Coeficiente de velocidade com vento a 0°	125
Figura 63 – Coeficiente de velocidade a 0° para modelos com 40% de área de abertura em relação à área do piso, variando a porosidade das portas.	126
Figura 64 – Coeficiente de velocidade a 0° para modelos com 8% de área de abertura em relação à área do piso, variando a porosidade das portas.	127
Figura 65 – Gráfico das velocidades do ar por ambiente, variando a dimensão da área de abertura.	129
Figura 66 – Recomendação para ambientes de permanência prolongada na Zona Bioclimática 8: aberturas de 30% da área da fachada.....	131
Figura 67 - Recomendação para ambientes de permanência prolongada nas Zonas Bioclimáticas de 1 a 7: aberturas de 20% da área da fachada.	132
Figura 68 - Recomendação para ambientes de permanência transitória nas Zonas Bioclimáticas de 1 a 8: aberturas de 10% da área da fachada.	133
Figura 69 – Ventilação cruzada sempre que possível na altura do usuário.....	134
Figura 70 – Aberturas em mais de uma fachada na mesma unidade habitacional podem favorecer a ventilação cruzada.	135
Figura 71 – A influência do entorno na ventilação natural dos edifícios em meio urbano.	136
Figura 72 – Priorizar incidências de vento inclinadas para beneficiar mais unidades habitacionais com a ventilação natural.....	137

Figura 73 – Etapas para configuração das aberturas com fins de ventilação natural em edificações residenciais. 138

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Resumo das principais contribuições relacionadas ao tema da tese.	62
Quadro 2 – Recomendações das Normas Brasileiras em relação à área de abertura para ventilação de acordo com a Zona Bioclimática.	72
Quadro 3 – Resumo das principais variáveis que influenciam o desempenho da ventilação natural nas edificações, com destaque para os aspectos escolhidos para análise.	82
Quadro 4 – Grupos de análise definidos para a pesquisa, mostrando as variáveis a serem consideradas em cada grupo.	83
Quadro 5 – Dimensionamento das aberturas em cada um dos quatro casos considerados.	84
Quadro 6 – Proporção entre aberturas de saída e entrada do vento em cada caso analisado.	86
Quadro 7 - Velocidades médias anuais do vento nas capitais brasileiras.	89
Quadro 8– Coeficientes de rugosidade de terreno adotados nas simulações.	92
Quadro 9- Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 8% e 12% de área de abertura em relação à área de piso. Incidência 0°.	103
Quadro 10 - Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 25% área de abertura em relação à área de piso: térreo e 3° pavimento. Incidência 0°.	104
Quadro 11 - Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 40% de área de abertura em relação à área de piso, variando a porosidade das portas internas. Incidência 0°.	105
Quadro 12 - Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 8% e 12% de área de abertura em relação à área de piso. Incidência 90°.	105
Quadro 13 - Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 25% área de abertura em relação à área de piso: térreo e 3° pavimento. Incidência 90°.	106
Quadro 14 - Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 40% de área de abertura em relação à área de piso, variando a porosidade das portas internas. Incidência 90°.	107
Quadro 15 - Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 8% e 12% de área de abertura em relação à área de piso. Incidência 135°.	108
Quadro 16 – Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 25% área de abertura em relação à área de piso: térreo e 3° pavimento. Incidência 135°.	109

Quadro 17 – Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 40% de área de abertura em relação à área de piso, variando a porosidade das portas internas. Incidência 135°.	110
Quadro 18 – Percentuais de área de abertura em relação ao piso e à fachada dos ambientes.	116
Quadro 19 – Percentuais obtidos na relação entre área de aberturas de entrada e saída nas unidades habitacionais dos modelos simulados.....	117
Quadro 20 – Recomendações para o dimensionamento das aberturas.....	133
Quadro 21 – Recomendações quanto à ventilação cruzada.....	135
Quadro 22 – Recomendações em relação à incidência dos ventos predominantes.	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Temperaturas globais de conforto (°C) de acordo com atividade e vestimenta, e correções para quando há movimento do ar.	33
Tabela 2 – Trecho da tabela de descontos das esquadrias contida no RTQ-R – Anexo II.41	
Tabela 3 – Frequência de ocorrência das velocidades médias do ar nas 27 capitais brasileiras.	90

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	22
1.1	Objetivos	27
1.1.1	Objetivo principal	27
1.1.2	Objetivos específicos	27
1.2	Estrutura da Tese	28
1.2.1	Fundamentação Teórica.....	28
1.2.2	Método.....	28
1.2.3	Resultados e discussão.....	28
1.2.4	Conclusões.....	29
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	30
2.1	Ventilação Natural nas Edificações	31
2.1.1	Ventilação para fins de conforto térmico.....	32
2.1.2	Configuração das aberturas.....	37
2.1.2.1	Dimensionamento	38
2.1.2.2	Forma e tipologia das esquadrias.....	39
2.1.2.3	Localização das aberturas e ventilação cruzada	42
2.2	Métodos de avaliação do desempenho da ventilação natural em edificações 43	
2.2.1	Simulação computacional como ferramenta de avaliação da ventilação natural: contribuições na área	45
2.2.2	Síntese das contribuições analisadas	61
2.3	Normatização e a ventilação natural em edifícios residenciais: potencialidades e limitações	63
2.3.1	Austrália.....	65
2.3.2	Portugal.....	66
2.3.3	Japão	67
2.3.4	Estados Unidos	68
2.3.5	Brasil.....	69
2.4	Síntese da Fundamentação Teórica	74
3	MÉTODO	76
3.1	Escolha e caracterização do modelo	77
3.2	Análise paramétrica de ventilação natural	80
3.2.1	Área de abertura.....	83

3.2.2	Relação entre área de aberturas de entrada e área de aberturas de saída na unidade habitacional.....	85
3.2.3	Porosidade das portas internas.....	86
3.2.4	Ângulo de incidência e velocidade dos ventos.....	87
3.3	Simulações computacionais através do software PHOENICS: configurações	90
3.3.1	Correção da velocidade do ar: consideração do entorno.....	91
3.3.2	Configuração do gradiente de vento.....	92
3.3.3	Cálculo do domínio.....	93
3.3.4	Configuração da malha.....	94
3.3.5	Parâmetros de relaxamento e critérios de convergência.....	96
3.4	Análise dos resultados das simulações.....	96
3.5	Aceitabilidade do movimento do ar.....	100
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	102
4.1	Análise Qualitativa.....	102
4.1.1	Incidência do vento a 0°.....	102
4.1.2	Incidência do vento a 90°.....	105
4.1.3	Incidência do vento 135°.....	107
4.1.4	Síntese da análise qualitativa.....	110
4.2	Análise Quantitativa.....	111
4.2.1	Velocidade do ar externa.....	111
4.2.2	Área de abertura.....	113
4.2.3	Relação entre área de aberturas de entrada e área de aberturas de saída na unidade habitacional.....	117
4.2.4	Porosidade das portas internas.....	118
4.3	Análise do coeficiente de velocidade.....	122
4.4	Análise da aceitabilidade do movimento do ar.....	128
4.5	Parâmetros Normativos para configuração das aberturas.....	130
4.5.1	Quanto ao dimensionamento das esquadrias.....	131
4.5.2	Quanto à ventilação cruzada.....	133
4.5.3	Quanto à incidência dos ventos.....	135
4.6	Avaliação da ventilação natural a partir da configuração das aberturas	138
4.7	Principais resultados e contribuições.....	140
4.8	Considerações sobre o uso do CFD.....	141
5	CONCLUSÕES.....	142

5.1	Limitações do trabalho e sugestões para trabalhos futuros	142
	REFERÊNCIAS	145
	OBRAS CONSULTADAS	152
	APÊNDICE A – MATRIZ DE SIMULAÇÃO	156
	APÊNDICE B – Coeficientes de velocidade – razão entre as velocidades internas em relação às velocidades externas na mesma altura	163
	APÊNDICE C – Planilha de resultados quantitativos – velocidades do ar interna para cada caso	185

1 INTRODUÇÃO

Dentre os aspectos que influenciam as decisões de projeto em arquitetura e urbanismo, as variáveis ambientais se destacam por possibilitarem a produção de espaços mais coerentes com o contexto climático do local onde estão implantados, envolvendo estratégias relacionadas ao conforto ambiental e à eficiência energética nas edificações.

A ventilação natural consiste no deslocamento do ar entre dois pontos do espaço, que pode ocorrer de duas formas: pela diferença de pressão gerada por ação do vento e pela alteração da densidade do ar causada pelas diferenças de temperatura. Seu uso nas edificações é uma das estratégias passivas mais importantes para minimizar o efeito de altas temperaturas, em especial em climas tropicais (KOENIGSBERGER, 1974; GIVONI, 1962; SANTAMOURIS; WOUTERS, 2006; AFLAKI *et al*, 2015).

Aflaki *et al* (2015) apontam a ventilação natural como principal estratégia para edifícios localizados em climas tropicais em comparação com outras técnicas passivas de condicionamento térmico. As temperaturas relativamente constantes ao longo do dia e do ano e os elevados índices de umidade relativa do ar fazem da ventilação natural a estratégia mais presente na arquitetura tropical. Dentre as vantagens do seu uso, destaca-se o seu potencial para reduzir o consumo de energia com aparelhos refrigeradores e ventiladores enquanto proporciona níveis de qualidade do ar interna aceitáveis, além do conforto térmico dos usuários (ALLOCCA *et al*, 2003; CHEN *et al*, 2017)

No Brasil, país de clima tropical, a ventilação é uma estratégia recomendada para 99% das cidades, com exceção apenas das cidades inseridas na Zona Bioclimática 1, que apresentam temperaturas mais baixas. O uso permanente da ventilação cruzada é recomendado para 53,7% do território brasileiro que corresponde à Zona Bioclimática 8 conforme classificação da NBR 15.220-3 A ventilação natural é recomendada ainda de forma seletiva nas demais regiões do país. (ABNT, 2005).

Apesar disto, a utilização da ventilação natural tem sido muitas vezes, negligenciada na elaboração de projetos de edificações. O advento da tecnologia dos sistemas de condicionamento artificial, bem como projetos arquitetônicos inadequados à realidade climática local, tem ocasionado a não utilização da ventilação natural em muitas edificações atuais (LIN e CHUAH, 2011; OMRANI, 2017). O controle das condições térmicas do ambiente, oferecido pela climatização artificial, se torna um atrativo ao seu uso, permitindo ao

usuário manter um ambiente interno confortável mesmo que as condições externas não sejam favoráveis (TRINDADE, PEDRINI, DUARTE, 2010).

É importante destacar que a ventilação natural utilizada para fins de conforto térmico, ao contrário da ventilação para higienização dos ambientes, não depende unicamente das trocas de ar, mas também da velocidade e da localização do escoamento de ar no espaço ocupado pelo usuário (AYNSLEY et al, 1977). Santamouris e Kolokotroni (2007) afirmam que as velocidades do ar necessárias para o resfriamento fisiológico dos usuários são mais altas do que as velocidades necessárias simplesmente para manter a qualidade do ar. Por isso, o estudo da velocidade e da distribuição das correntes de ar no espaço habitado é tão importante para identificação das situações onde existe potencial para proporcionar conforto térmico aos usuários e conseqüentemente eficiência no uso da energia.

McNeil e Letschert (2008) mostram o aumento no consumo de energia elétrica no setor residencial devido ao uso de ar condicionado. Os autores citam o caso da China, onde houve um aumento de 63% de famílias que possuem ar-condicionado em suas residências entre os anos de 1990 a 2003 e apontam para a necessidade de rever os requisitos mínimos de eficiência energética de edifícios e equipamentos de condicionamento de ar.

No Brasil, o consumo de energia elétrica tem crescido nos últimos anos em todos os setores da economia. De acordo com o Balanço Energético Nacional, em 2006, de toda energia elétrica consumida no país, 45,2 % foi nos setores residencial, comercial e público. Entre estes segmentos, o setor residencial é responsável por 22,2% do consumo de energia, ficando o setor comercial com 14,3% deste consumo. (BRASIL, 2008).

O Brasil apresenta uma matriz de geração elétrica de origem predominantemente renovável, sendo que a geração hidráulica responde por montante superior a 74% da oferta (BRASIL, 2011). Aliado a isto, diversas políticas para economia de energia vêm sendo lançadas pelo Governo Federal desde 2001, quando houve no país a crise energética que ficou conhecida como “Apagão”.

Neste mesmo ano a Lei nº. 10.295, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia foi promulgada (BRASIL, 2001a). A partir dela veio o decreto nº 4059 de 19 de dezembro de 2001 (BRASIL, 2001b) que regulamentou esta Lei estabelecendo “níveis máximos de consumo de energia, ou mínimos de eficiência energética, de máquinas e aparelhos consumidores de energia fabricados ou comercializados no País, bem como as edificações construídas”.

Em 2009 o Brasil entrou para o grupo de países com normas para eficiência energética de edifícios, com o lançamento do Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética para Edificações Comerciais, de Serviços e Públicas (RTQ-C), publicado pelo INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Metrologia). A exemplo do RTQ-C, entrou em vigor em 2011, o Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética para Edificações Residenciais (RTQ-R).

Apesar de incentivos financeiros para economia de energia nas edificações, ainda é bastante comum o uso de aparelhos de refrigeração em edificações residenciais. Neste contexto, destaca-se o crescimento do setor residencial em termos de quantidade de unidades habitacionais no país. Segundo IBGE (2014) o número de domicílios vêm crescendo mais do que a própria população:

É importante notar que o número total de domicílios vem se expandindo em ritmo superior ao crescimento da população. Enquanto a população brasileira cresceu 9,8% entre 2004 e 2013, o número total de domicílio particulares no Brasil cresceu 25,1% no mesmo período. Esse processo impacta a necessidade de expansão da oferta de habitações com acesso a serviços básicos e é influenciado por fatores diversos, que vão desde as mudanças demográficas da população (queda das taxas de fecundidade, envelhecimento populacional, mudanças nos arranjos familiares) até os fatores econômicos (aumento do rendimento médio da população, crescimento econômico, dinâmica do mercado imobiliário e do setor de construção civil, expansão do crédito e programas de habitação popular).

Este fato implica na necessidade de planejar essas habitações de maneira a garantir a qualidade de vida da população, proporcionando segurança, salubridade e conforto térmico. Entretanto, as recentes pesquisas de avaliação do ambiente construído indicam uma série de problemas que resultam em um desempenho muito aquém do esperado por parte dos edifícios em uso. Esses estudos demonstram que o atual parque edificado brasileiro é bastante ineficiente, apresentando grande dependência dos recursos artificiais, sejam para climatização ou iluminação dos ambientes (FERREIRA, 2006).

O uso da ventilação natural nas edificações está condicionado tanto à disponibilidade de ventos e condições de temperatura do ar, quanto às configurações do edifício, por isso é importante a análise das características climáticas locais e do envelope construído para um melhor aproveitamento deste recurso natural. Os fatores que influenciam o desempenho da ventilação natural em edificações são inúmeros e podem se relacionar de diversas maneiras entre si. Além dos aspectos microclimáticos citados, as características arquitetônicas são determinantes no grau de aproveitamento da ventilação natural do edifício, tais como leiante e

dimensionamento dos ambientes, configuração das aberturas, partições internas, barreiras externas e orientação do edifício em relação aos ventos dominantes.

Dentre estes aspectos, as janelas são muitas vezes a única maneira que o usuário tem de controlar as condições microclimáticas do ambiente interno. Sua disposição, área, localização e tipologia podem influenciar o desempenho da ventilação natural. De acordo com Gandemer et al (1992 apud Bittencourt e Candido, 2008), o tamanho, a forma e a localização das aberturas para ventilação são os principais aspectos que irão determinar a configuração do fluxo de ar no interior das construções.

A configuração das aberturas e sua influência no desempenho da ventilação natural em edifícios tem sido objeto de diversas pesquisas internacionais (HASSAN, *et al* 2007; FAVAROLO; MANZ, 2005; LUKKUNAPRASIT, *et al*, 2009; TANTASAVASDI, *et al*, 2001; YIN, *et al*, 2010) e brasileiras (BITTENCOURT; LOBO, 1999, TOLEDO, 1999, VERDELHO, 2008; VERSAGE, 2009, CUNHA, 2010; SACRAMENTO, 2012). Apesar disto, as normas no país ainda não contemplam diretrizes consistentes que auxiliem projetistas na tomada de decisões, por exemplo, quanto ao dimensionamento, localização ou tipologia das esquadrias.

A NBR 15.220 (ABNT, 2005) lança diretrizes para construção de habitações de interesse social onde, para a Zona Bioclimática oito, por exemplo, as principais recomendações são: ventilação cruzada e proteção solar. Sobre as aberturas, a Norma recomenda apenas que o tamanho delas seja equivalente a 40% da área do piso do ambiente. Da mesma forma, a NBR 15.575 (ABNT, 2013) traz recomendações quanto ao dimensionamento das aberturas em relação à área de piso dos ambientes. Entretanto, a recomendação para a mesma Zona Bioclimática é que a área de abertura seja maior ou igual a 8% da área do piso do ambiente, índice que representa 20% da área recomendada pela NBR 15.220 (ABNT, 2005).

Além disto, ambas as NBRs não mencionam questões como a necessidade de abertura de entrada e de saída, tipologia da esquadria, distribuição das aberturas e orientação em relação aos ventos predominantes. Da mesma forma, para as demais Zonas Bioclimáticas Brasileiras, as referidas NBRs sugerem percentuais diferentes de abertura para ventilação natural de acordo com as suas características climáticas.

Os regulamentos de eficiência energética lançados pelo INMETRO (BRASIL, 2009; 2012), representam um grande passo para a construção de edifícios mais eficientes

energeticamente. Entretanto, ainda apresentam significativas limitações, principalmente na análise da ventilação natural como estratégia para redução de consumo de energia na maioria das Zonas Bioclimáticas do país. Isto ocorre, entre outros fatores, devido às dificuldades que envolvem o estudo da ventilação natural.

O RTQ-R avalia a ventilação natural na análise de pré-requisitos e nas bonificações. Como pré-requisito considera a ventilação em três aspectos: percentual de área mínima de abertura efetiva para ventilação em ambientes de permanência prolongada em relação à área de piso destes ambientes, banheiros com ventilação natural direta e relação de área de abertura de saída por área de abertura de entrada atendendo a proporção de 25% na unidade habitacional, proporcionando ventilação cruzada.

Apesar de considerar outros aspectos importantes no desempenho da ventilação natural, além da área de abertura, ainda é possível identificar algumas lacunas na avaliação sugerida pelo RTQ-R. O percentual de área mínima de abertura exigido, por exemplo, não garante a adequada orientação das esquadrias nem sua distribuição no ambiente. A razão entre áreas de abertura de entrada por área de abertura de saída, quando fora da proporção indicada (25%) também não é considerada tornando-se um ponto negativo na avaliação, segundo o RTQ-R.

Percebe-se, portanto que as normas e regulamentos brasileiros apresentam algumas divergências e lacunas nas suas formas atuais de avaliação da ventilação natural nas edificações, tais como: desacordos quanto à área de abertura em relação à área do piso necessária; ausência de recomendações quanto à localização e tipo das esquadrias; ausência de recomendações quanto à ventilação cruzada no ambiente, dentre outros.

Apesar da importância da ventilação natural para obtenção de conforto térmico nas edificações, pouco tem sido proposto em termos de normas e regulamentações. As normas em vigor no Brasil apresentam diretrizes que divergem entre si, além de serem aparentemente insuficientes do ponto de vista da ventilação natural.

Portanto, a definição da configuração das aberturas em edificações residenciais para promoção de conforto térmico e eficiência energética através do aproveitamento da ventilação natural em cidades brasileiras torna-se de fundamental importância, principalmente para buscar informações consistentes que possam embasar decisões projetuais, dada a carência nas atuais normas de desempenho de edificações no Brasil. Além disto, é preciso considerar

outros aspectos relacionados às janelas, tais como vistas, iluminação natural, acústica, dentro outros.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo principal

- Identificar parâmetros essenciais da configuração das aberturas que possam ser utilizados em Normas Brasileiras para fins de aproveitamento da ventilação natural em edificações residenciais multifamiliares.

1.1.2 Objetivos específicos

- Avaliar o efeito conjugado do dimensionamento das aberturas e da porosidade das portas internas no desempenho da ventilação natural em edificações residenciais.
- Identificar as relações existentes entre os principais parâmetros de configuração das aberturas analisados: dimensionamento das aberturas, porosidade das portas internas e relação de área de abertura de entrada por área de abertura de saída.
- Elaborar recomendações para a configuração das aberturas em edificações residenciais com o objetivo de aproveitar a ventilação natural como estratégia projetual.

1.2 Estrutura da Tese

1.2.1 Fundamentação Teórica

A seção 2 traz o arcabouço teórico em que se baseia esta tese, composto por três subseções: Ventilação Natural nas edificações, onde são abordados aspectos norteadores da tese como a ventilação natural para fins de conforto térmico e a importância da configuração das aberturas para o aproveitamento da ventilação natural. Em seguida, aborda-se a avaliação do desempenho da ventilação natural, trazendo métodos existentes e trabalhos recentes que realizaram avaliações deste tipo, buscando identificar os procedimentos utilizados. Por último a seção traz uma parte sobre Normatização e Ventilação natural, buscando as principais normas internacionais e brasileiras que tratam de desempenho térmico das edificações, mais especificamente sobre o desempenho da ventilação natural, suas potencialidades e limitações.

1.2.2 Método

A seção 3 apresenta o método adotado no trabalho e seus respectivos procedimentos metodológicos. Primeiramente, apresenta-se a justificativa para escolha dos parâmetros que afetam a ventilação natural em edificações que serão analisados nesta tese (item 3.1). Em seguida, o modelo a ser utilizado é caracterizado e sua escolha justificada (item 3.2). No item 3.3 a ferramenta de simulação é apresentada, bem como as configurações necessárias para o desenvolvimento das simulações, com a descrição de todos os procedimentos envolvidos no processo de simulação e extração/visualização de resultados para análise. Por último, a autora descreve como foi feita a análise da aceitabilidade do movimento do ar a partir dos dados obtidos nas simulações (item 3.4).

1.2.3 Resultados e discussão

A seção 4 traz os resultados obtidos e as discussões geradas por estes no desenvolvimento da tese. Os itens 4.1 e 4.2 tratam da análise qualitativa e quantitativa respectivamente, envolvendo a distribuição do fluxo de ar e os dados de velocidade do ar, resultantes das simulações realizadas, incluindo a análise do coeficiente de velocidade calculado assim como em Givoni (1962) para cada situação. Em seguida, apresenta-se a análise da aceitabilidade térmica dos valores de velocidade encontrados com base em Candido (2010) (item 4.3).

Ainda nesta seção são feitas as considerações gerais sobre os dados encontrados, e a elaboração de parâmetros normativos para configuração de aberturas em edificações

residenciais, objetivo principal desta tese (item 4.4). O item 4.5 buscou organizar as etapas necessárias para avaliação da ventilação natural a partir da configuração das aberturas em edificações residenciais com base no processo projetual. Por fim, o item 4.6 resume os principais resultados e contribuições desta tese e o item 4.7 relaciona algumas observações sobre o uso do CFD.

1.2.4 Conclusões

A seção 5 apresenta as conclusões, relacionadas aos objetivos propostos e resultados alcançados, com destaque para as limitações da investigação e sugestões para trabalhos futuros (item 5.1).

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

O presente trabalho pretende contribuir com os estudos na área de ventilação natural em edificações residenciais, abordando mais especificamente a avaliação do impacto de diferentes configurações das aberturas no desempenho da ventilação natural. Para tal, se faz necessária a construção de um referencial teórico que proporcione embasamento para as discussões que serão feitas posteriormente. Essa fundamentação teórica foi dividida em três temas importantes: Ventilação natural nas Edificações, Avaliação do desempenho da Ventilação Natural (VN) em edificações com foco no uso de simulações computacionais e Normatização em Ventilação Natural (**Figura 1**).

Figura 1 – Principais temas do trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora.

No primeiro tema são abordadas as principais funções da ventilação natural nos edifícios, com enfoque no resfriamento fisiológico para a obtenção de conforto térmico, bem como os parâmetros arquitetônicos que influenciam o desempenho da ventilação natural, com destaque para a configuração das aberturas que é o foco principal deste trabalho. No segundo tema, é abordada a simulação computacional como ferramenta na avaliação da ventilação natural em edificações, com base em trabalhos que utilizaram o modelo CFD para avaliar a ventilação em edifícios residenciais, em especial analisando a configuração das aberturas, procurando conhecer os potenciais e limitações do uso desta ferramenta. No terceiro e último tema da fundamentação teórica, são analisadas as principais normas, regulamentos e códigos, internacionais e nacionais que abordam o uso da ventilação natural em edifícios residenciais.

2.1 Ventilação Natural nas Edificações

A ventilação é parte fundamental do projeto de edificações, pois possibilita conferir aos ambientes uma adequada qualidade do ar, podendo favorecer o conforto térmico, especialmente em climas quentes. De maneira geral, a ventilação é o efeito do movimento do ar nos edifícios e pode ocorrer basicamente de duas formas: natural ou mecânica.

A ventilação natural acontece devido às diferenças de pressão na superfície da envoltória de uma determinada edificação. Essas diferenças de pressão podem ser geradas pela ação do vento ou pelas diferenças de temperatura entre dois pontos do edifício, neste caso conhecida como ventilação por efeito chaminé. Neste caso, a intensidade da ventilação por efeito chaminé dependerá das diferenças de temperatura entre o ar interno e o ar externo, bem como das diferenças de altura entre as aberturas de entrada e as aberturas de saída do ar. Ambos os efeitos podem ser complementares e acontecer simultaneamente (HYDE, 2000).

Em edificações, a ventilação natural pode se dar ainda de maneira permanente ou controlada. A ventilação permanente ocorre através de elementos permanentemente abertos como venezianas e cobogós ou das frestas das aberturas, também chamada de infiltração. A ventilação controlada é aquela na qual o vento se desloca através dos componentes móveis que compõem as aberturas de uma edificação, controladas pelos usuários. Este trabalho foca na ventilação natural por ação dos ventos no interior dos ambientes cujas aberturas possam ser controladas pelos usuários.

A ventilação natural possui basicamente três funções:

1. Manter a qualidade do ar dentro dos níveis de segurança para o usuário;
2. Proporcionar conforto térmico aos usuários;
3. Permitir o resfriamento da própria edificação, através das trocas térmicas entre o ar interno e externo.

A primeira função está relacionada à saúde e à segurança dos usuários e as outras duas funções, ao bem-estar dos usuários e à eficiência energética da edificação. Quanto à qualidade do ar interno, Santamouris e Kolokotroni (2007) afirmam que a ventilação natural deve prover oxigênio suficiente aos usuários, diluindo a níveis aceitáveis a concentração do dióxido de carbono produzido pelos ocupantes, assim como outros poluentes. Além disto, em climas úmidos, a ventilação natural auxilia na diminuição da sensação de desconforto causada pelo excesso de umidade, favorecendo um ambiente mais salubre e a conservação dos materiais de construção ao diminuir as chances de proliferação de mofo e bolor.

A qualidade do ar interno é fundamental para o ser humano, visto que em algumas regiões, cerca de 90% da vida humana se passa no interior dos espaços arquitetônicos (SUNDELL, 2004). Portanto, uma adequada ventilação natural pode promover alta qualidade do ar interno evitando a proliferação de doenças e mantendo a saúde dos seus usuários, vantagem que não é proporcionada pela maioria dos sistemas fechados de condicionamento de ar, como por exemplo, os *splitsystem*.

2.1.1 Ventilação para fins de conforto térmico

Uma importante função da ventilação natural é promover a sensação de conforto térmico dos usuários¹. As condições para obtenção de conforto através do resfriamento passivo das edificações dependerão do contexto climático onde se inserem.

Conforme citado anteriormente, em climas quentes e úmidos, que se caracterizam por temperaturas relativamente altas e precipitação abundante, a ventilação natural muitas vezes é a principal estratégia para promoção do conforto, pois contribui para a sensação de refrescamento. O movimento do ar ajuda na promoção de conforto térmico por causa da evaporação do suor da pele e das trocas térmicas por convecção que ocorrem entre a corrente do ar e o corpo humano (AYNSLEY et al, 1977; BITTENCOURT, 1993). Portanto, edificações porosas com estratégias de ventilação cruzada e ventilação na altura do usuário, por exemplo, devem ser priorizadas em cidades com este perfil climático.

Por outro lado, em regiões de clima temperado, com estações bem definidas e grandes variações de temperatura, a ventilação natural deve ser seletiva com uso de estratégias arquitetônicas que permitam a porosidade da edificação para aproveitamento dos ventos em dias quentes, sem comprometer seu isolamento em dias frios, proporcionando aos usuários conforto térmico.

Para Givoni (1992), a ventilação natural pode promover conforto térmico de duas formas: através do resfriamento fisiológico direto, ao aumentar a velocidade do ar no interior de um edifício ou através do resfriamento da massa edificada, que pode ser obtido pela

¹O conforto térmico pode ser definido como um estado de satisfação com o ambiente térmico onde o indivíduo se insere (ASHRAE, 1992). Depende de fatores humanos como o metabolismo e a vestimenta, bem como de fatores climáticos, como temperatura, umidade e velocidade do ar, por exemplo. Segundo a ASHRAE, a adaptação térmica humana é composta por três fatores: comportamental, fisiológico e psicológico (ASHRAE RP-884, 1997).

ventilação noturna, quando um edifício é ventilado durante a noite, visando remover a carga térmica absorvida durante o dia.

Segundo Santamouris e Wouters (2006) pessoas que vivem em edifícios ventilados naturalmente são capazes de controlar melhor o seu ambiente e se adaptar mais facilmente a variabilidade climática e possíveis mudanças de temperatura. Além disto, apresentam um intervalo maior de preferência de temperaturas e velocidades do ar.

A sensação térmica dos usuários depende do efeito combinado de diversos fatores, tais como, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do ar, temperatura radiante e também das variáveis humanas como a vestimenta e a atividade desenvolvida pelo usuário, dentre outras. O BRE – Building Research Establishment sugere que os valores de temperatura do ar sejam corrigidos em função da velocidade do ar e das variáveis humanas: vestimenta e atividade, conforme **Tabela 1** a seguir.

Tabela 1 – Temperaturas globais de conforto (°C) de acordo com atividade e vestimenta, e correções para quando há movimento do ar.

Vestimenta	Atividade			
	Dormindo	Sentado	Em pé	Ativo
Nenhuma	31	29	25	23*
Leve	29	26	21	18*
Normal	27	23	17	13*

Movimento do ar (m/s)	Correção a ser adicionada (°C)			
0.2	0.5	1.0	1.0	1.5
0.4	1.0	1.5	2.0	3.0
0.7	1.5	2.0	3.0	4.0
1.0	1.5	2.5	3.5	5.0

*Estimativa sujeita a alguma incerteza

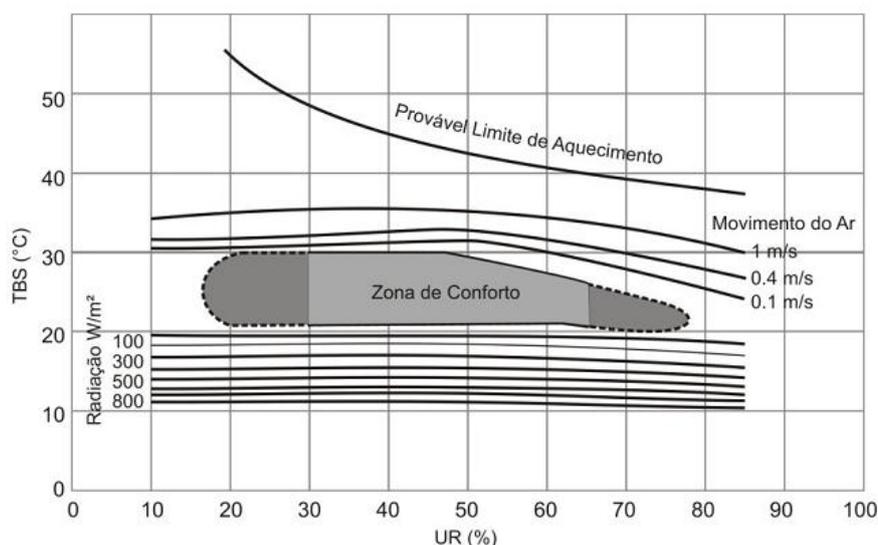
Fonte: BRE (1979 apud BITTENCOUT, 1993).

Outros estudos ainda têm sido desenvolvidos no intuito de identificar as faixas de velocidade do ar em que os usuários se dizem mais confortáveis (TANABE, 1988, TOFTUM, ZHOU, MELIKOV, 1997, NICOL, 2004; ARAÚJO, 1996; ARAÚJO, 2008; CANDIDO et al, 2008).

A maioria destes estudos expressa a sensação de conforto como uma temperatura efetiva ou operativa², que é determinada a partir da temperatura do ar, umidade, radiação e movimento do ar.

O diagrama psicrométrico dos irmãos Olgyay desenvolvido na década de 1950 serviram como base para diversas pesquisas posteriores, como a de Koenigsberger (1974) que sugere a extensão do limite superior da zona de conforto a partir do aumento da velocidade do ar (**Figura 2**).

Figura 2 – Carta Bioclimática para climas quentes.



Fonte: SACRAMENTO, 2012, adaptado de SZOKOLAY, 2004.

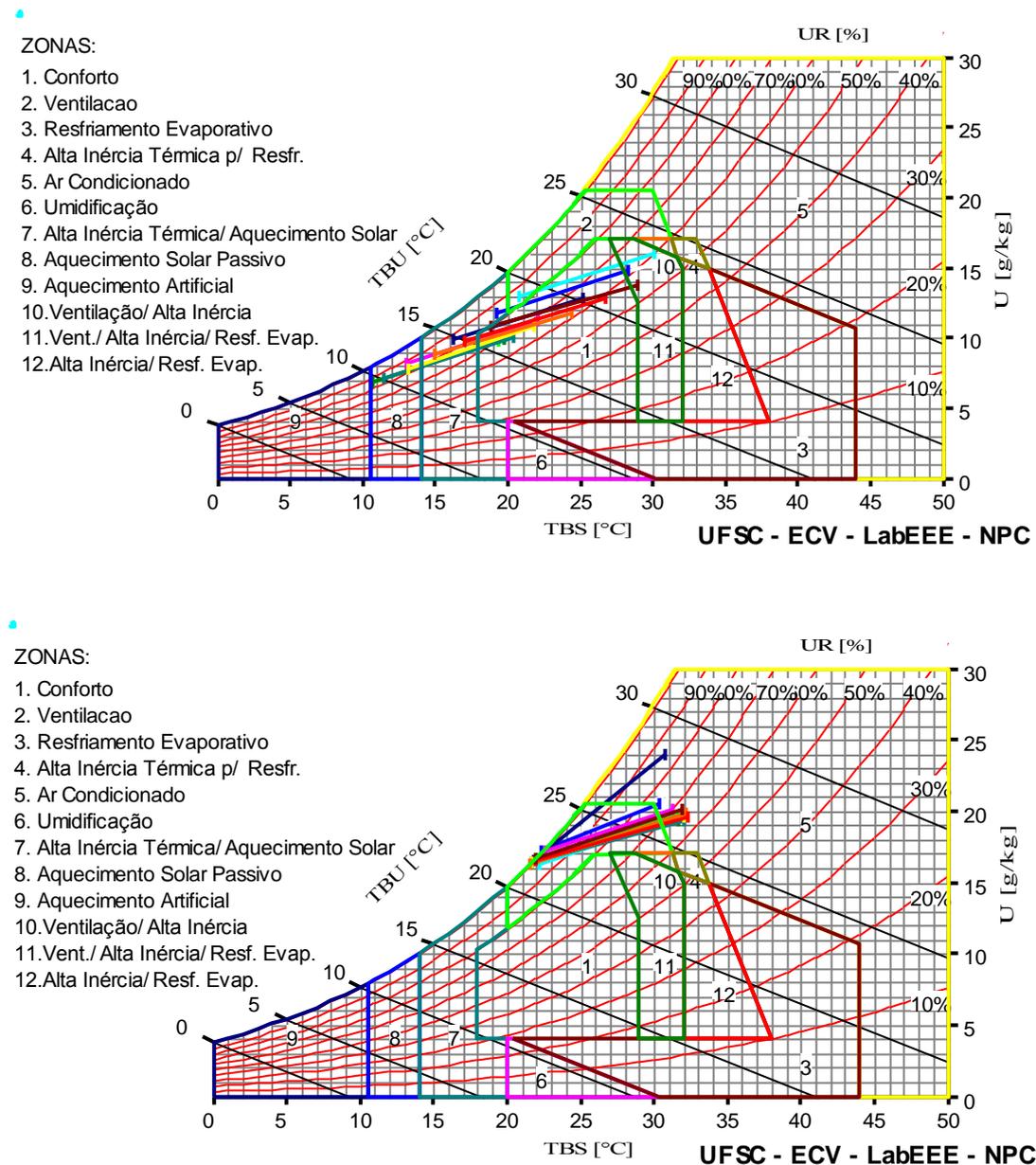
Givoni (1976) adaptou o diagrama de Olgyay para países em desenvolvimento e considerou edificações ventiladas naturalmente, sugerindo alternativas para as horas de desconforto por frio ou por calor. A carta bioclimática de Givoni possui doze zonas sendo a zona 1 a zona de conforto térmico. As demais zonas correspondem à possibilidade de extensão da zona de conforto em consequência da adoção de estratégias de projeto indicadas, como a ventilação natural, por exemplo.

Esta estratégia é recomendada para a maioria das cidades brasileiras em alguma época do ano, para Belém, por exemplo, cidade de clima quente e úmido, a ventilação natural é recomendada para 89% das horas desconfortáveis. Já para Porto Alegre, no Sul do país, 23,4% das horas do ano seriam mais confortáveis se a ventilação natural fosse implementada

² Temperatura Operativa é a temperatura uniforme de um ambiente radiante negro hipotético, onde um ocupante poderia trocar a mesma quantidade de calor por radiação e convecção que no ambiente real. Pode ser calculada com suficiente aproximação como sendo o valor médio entre a temperatura do ar e a temperatura média radiante (LAMBERTS *et al*, 2013)

como estratégia de projeto nas edificações, com base na Carta bioclimática de Givoni (**Figura 3**).

Figura 3 – Carta Bioclimática de Givoni para Porto Alegre-RS e Belém-PA, respectivamente.

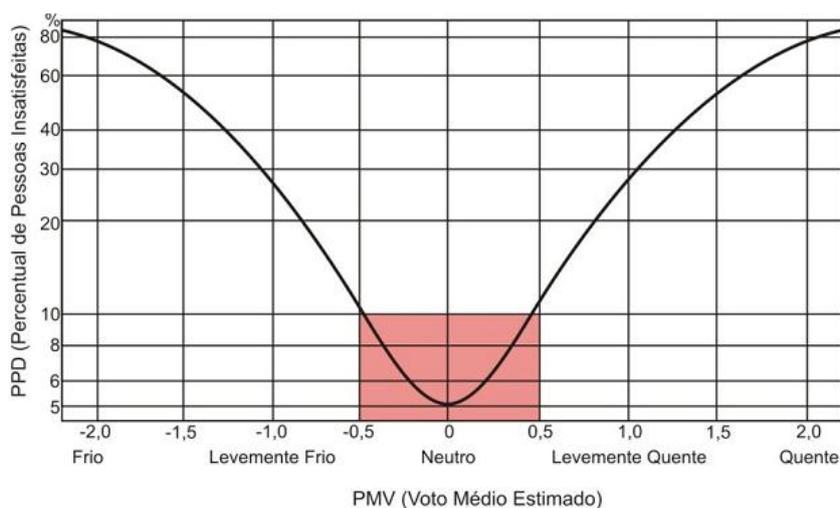


Fonte: UFSC/LABEEE, 2010.

Esta estratégia é recomendada também em outras cidades de clima quente como Maceió em 75% das horas do ano, Natal em 83,5% e Fortaleza em 85,8% das horas anuais. E também em cidades de outras regiões brasileiras como Brasília em 15% das horas do ano, Florianópolis (36,4%) e Rio de Janeiro (61%) o que demonstra a importância desta variável na promoção do conforto térmico dos usuários no interior das edificações.

Uma pesquisa realizada por Fanger (1972) relacionou as variáveis humanas metabolismo e vestimenta e as variáveis ambientais: temperatura do ar, temperatura radiante média, velocidade do ar e umidade para estabelecer o voto médio predito (PMV) e o percentual de pessoas insatisfeitas (PPD) (**Figura 4**). O modelo de Fanger foi realizado com base em experimentos extensivos com usuários em ambientes controlados na Dinamarca e sua influência nos estudos de conforto térmico é mundialmente reconhecida, sendo utilizado em normas como a ASHRAE Standard 55, CEN CR 1752 e a ISO 7730.

Figura 4 – Escala de conforto de Fanger (PMV/PPD).



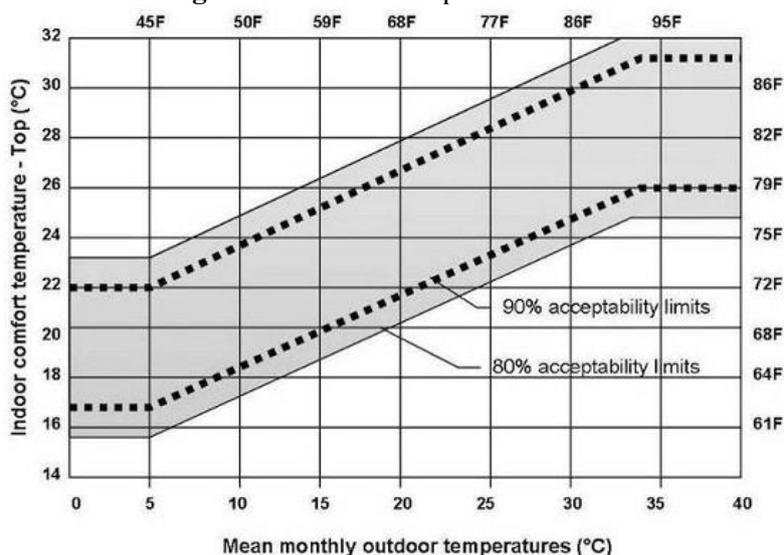
Fonte: Figueiredo (2007) apud Sacramento, 2012.

Entretanto, Candido et al (2008) constataram que:

As with any theory, model or index, Fanger's legacy has been both widely supported and widely criticized. In his dissertation, Fanger stated that the PMV model was derived in laboratory settings and should therefore be used with care for PMV values below -2 and above +2. Especially on the hot side, Fanger foresaw significant errors. But probably the most important criticism is the concept of a universal "neutral" temperature.

Neste sentido, o modelo adaptativo de conforto (**Figura 5**) considera a ação do usuário no meio, de forma a torná-lo mais agradável e, por isto, este modelo se torna mais adequado às regiões de clima quente e úmido e especialmente às edificações ventiladas naturalmente. É um modelo de conforto no qual a física e a fisiologia humana interagem com a percepção térmica (BRAGER; DE DEAR, 1998).

Além disto, "a abordagem adaptativa é baseada em estudos de campo sobre o conforto térmico e demonstra que as pessoas são mais tolerantes às mudanças de temperatura" (DARBY; WHITE, 2005 apud SACRAMENTO, 2012).

Figura 5 – Modelo adaptativo de conforto.

Fonte: DE DEAR; BRAGER, 1998.

Destaca-se a importância dos estudos mais recentes de conforto térmico que têm avaliado as preferências dos usuários em cidades de climas tropicais, aproximando os índices desta realidade climática, já que as pesquisas iniciais ocorreram em climas temperados. Apesar de não haver consenso entre os pesquisadores acerca da velocidade do ar mais confortável, a pesquisa de Candido et al (2008) sugere a aceitação de limites mais altos de velocidade do ar, que por sua vez, depende da configuração das aberturas das edificações, destacando a importância dessas aberturas na obtenção de conforto térmico em regiões de clima quente e úmido.

2.1.2 Configuração das aberturas

Segundo Gao e Lee (2011), o desempenho da ventilação natural é afetado por fatores externos e internos. Os externos incluem: a forma urbana, a tipologia do edifício e sua exposição aos ventos dominantes, bem como as condições microclimáticas. Os internos são: o layout das partições internas e a configuração das aberturas, incluindo a caracterização das janelas e das portas.

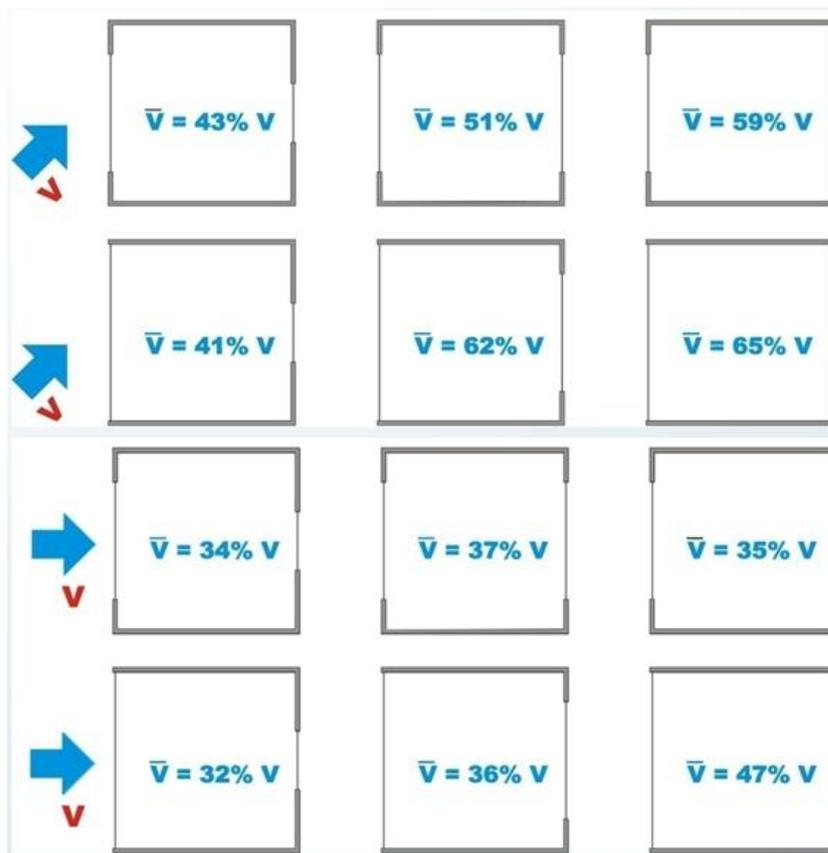
Conforme explicitado anteriormente, o foco deste trabalho é o desempenho da ventilação natural em função da configuração das aberturas. Por configuração das aberturas entende-se: o dimensionamento, a forma e tipo de esquadria, a localização das aberturas, a existência de ventilação cruzada e a orientação em relação à incidência de ventos na edificação. Esta seção discute os principais aspectos sobre este tema.

2.1.2.1 Dimensionamento

Conforme discutido no início deste trabalho, a dimensão das aberturas é um fator determinante para obtenção das taxas de ventilação necessárias para proporcionar o conforto térmico aos ocupantes de um edifício. Isto se reflete nas normas de desempenho existentes, porém, conforme será visto adiante, outros parâmetros também podem alterar significativamente o desempenho da ventilação natural nos ambientes.

Segundo Van Straaten *et al* (1967) maiores taxas de ventilação serão obtidas quando as aberturas a sotavento forem maiores do que as aberturas a barlavento em um edifício. Este fato foi confirmado pelos experimentos desenvolvidos por Givoni (1976), conforme se ilustra a seguir.

Figura 6 - Velocidade média do ar interno em relação ao vento externo (%) em função da relação entre as aberturas de entrada e saída do ar, para incidências do vento a 45° e 90°.

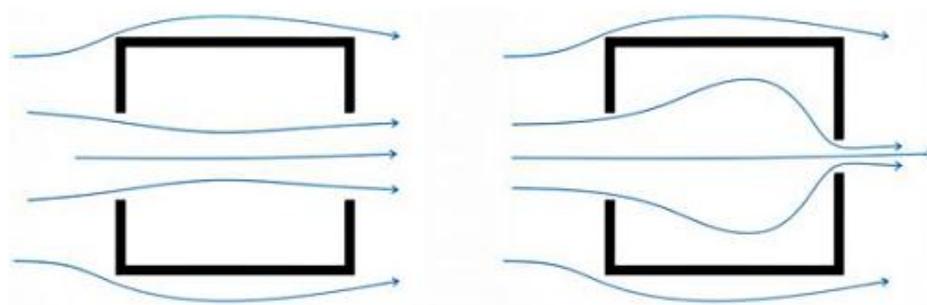


Fonte: Givoni, 1976, apud Bittencourt; Candido, 2008.

Sabe-se ainda que aberturas de entradas de ar maiores que as saídas provocam uma redução do fluxo de ar. Porém, esta configuração propicia uma distribuição mais uniforme da velocidade do ar dentro do ambiente (**Figura 7**). Já em casos onde as aberturas de entrada e

de saída são iguais, a média da velocidade interna de ar depende da “porosidade da construção, representada pela razão do total da área aberta dividida pela área da parede onde se localiza a abertura, independentemente da direção do vento” (ERNEST, 1991 apud BITTENCOURT; CANDIDO, 2008).

Figura 7 – Distribuição do fluxo de ar conforme o tamanho das aberturas.



Fonte: Bittencourt; Candido, 2008.

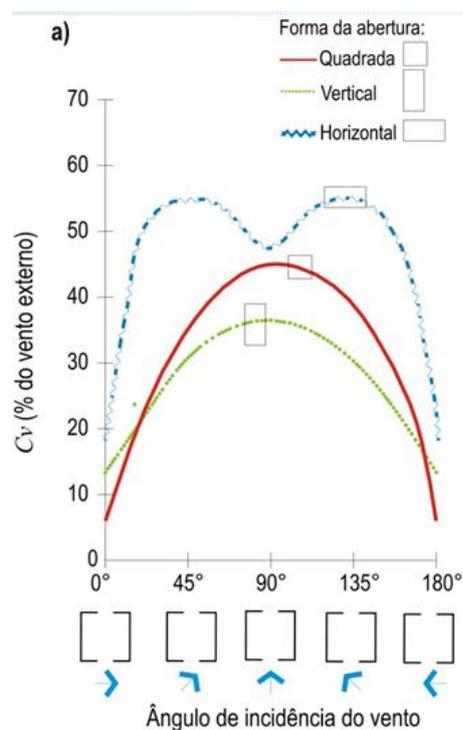
Por exemplo, uma construção com 40% de porosidade produz uma velocidade de ar média interna aproximadamente duas vezes maior que em outra com 15% de porosidade. O aumento na porosidade da construção produz também uma maior uniformidade da velocidade do ar nos espaços interiores (GANDEMER, 1992; EVANS, 1980 apud BITTENCOURT; CANDIDO, 2005).

É importante observar que esses estudos estão sempre relacionando o dimensionamento das aberturas de entrada ao dimensionamento das aberturas de saída, mostrando que essa variável é fundamental no que se refere à velocidade do ar nas edificações, embora outros fatores afetem também o desempenho da ventilação natural como será visto a seguir.

2.1.2.2 Forma e tipologia das esquadrias

Quanto à forma das aberturas, Sobin (1981 apud Bittencourt; Candido, 2005) avaliou o desempenho da ventilação natural nos ambientes variando em horizontal, vertical e quadrada, sem alterar a área das mesmas. O autor conclui que a forma horizontal apresenta melhor desempenho em relação às demais investigadas porque aumenta a eficácia da ventilação natural em especial para incidências oblíquas de vento, além de contribuir para uma distribuição mais ampla do fluxo de ar no interior dos ambientes.

Figura 8 – Efeito da forma das aberturas em função da incidência do vento.

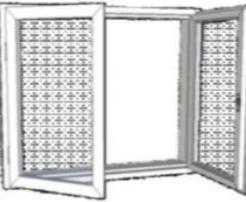
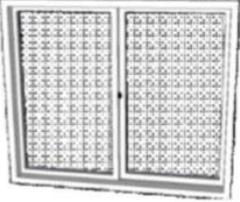


Fonte: Sobin, 1981 apud Candido e Bittencourt, 2005.

Existem vários tipos de esquadrias no mercado da construção civil. Sua escolha dependerá do tipo do projeto, ambiente a que se destina, função, sistema construtivo utilizado, dentre outros. Entretanto, esta escolha certamente influenciará no desempenho da ventilação natural dentro dos ambientes.

Cada tipo de esquadria possui uma estrutura que permite a passagem da ventilação. O percentual de área efetivamente aberta à ventilação natural em relação à área da esquadria que bloqueia a ventilação definirá a porosidade desta esquadria. Esta relação é utilizada no RTQ-R (Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais), para definir um “desconto” em função da tipologia das esquadrias. Alguns exemplos podem ser vistos a seguir (**Tabela 2**).

Tabela 2 – Trecho da tabela de descontos das esquadrias contida no RTQ-R – Anexo II.

Tipo de Janela	Ilustração	% abertura para iluminação natural	% abertura para ventilação natural
Abrir 90º (ou de giro) 1 ou 2 folhas		90	90
De correr (ou deslizante) 2 folhas		80	45
De correr (ou deslizante) 3 folhas sendo 2 venezianas		45	45

Fonte: BRASIL, 2012.

Outro fator importante sobre o tipo da esquadria, além do seu mecanismo de abertura, é a possibilidade de controle. Em todas as situações, mas principalmente em climas de maiores variações de temperatura, é importante que os usuários possam controlar a abertura, optando pelo seu fechamento total ou pela sua abertura parcial ou total. Algumas tipologias ainda, afetam a distribuição do fluxo pelos ambientes, como por exemplo, as venezianas móveis que podem ser direcionadas para cima ou para baixo conforme o posicionamento determinado pelos usuários.

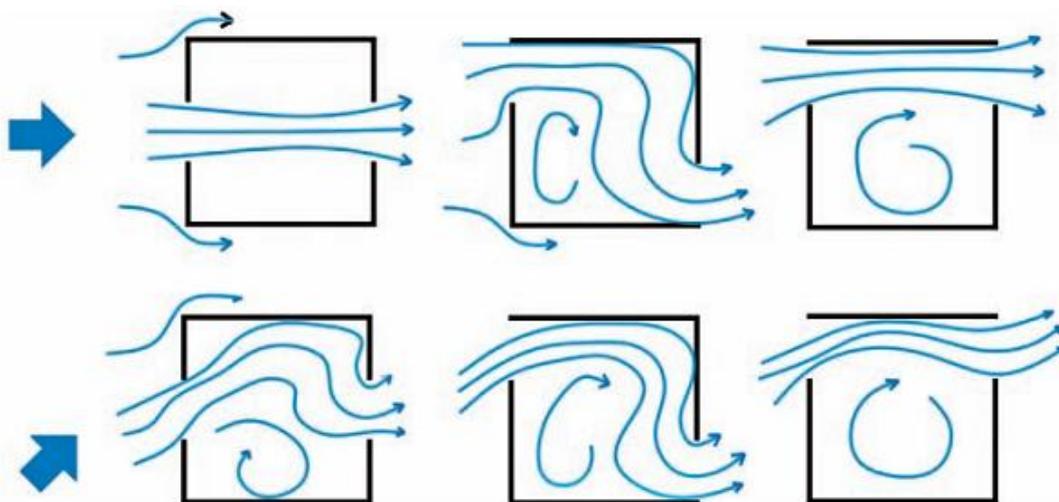
A tipologia da esquadria, portanto, deve ser definida pelo projetista de modo a garantir uma maior flexibilidade no direcionamento do fluxo de ar e um maior controle da porosidade das esquadrias. É importante ressaltar que nesta tese, trabalhou-se com as áreas efetivas das aberturas que permitem a passagem da ventilação natural, sendo necessário, portanto, considerar possíveis aumentos nas áreas das janelas a depender do tipo de esquadria a ser utilizado no projeto.

2.1.2.3 Localização das aberturas e ventilação cruzada

A localização das aberturas em função dos ventos predominantes na região é fundamental para o aproveitamento da ventilação natural no interior dos edifícios. Seu posicionamento nos ambientes, bem como a existência de aberturas de entrada e saída do ar, irão determinar os campos de pressão gerados no entorno dessas aberturas e, conseqüentemente, a distribuição das correntes de ar no interior desse ambiente.

Alguns estudos já foram realizados acerca da importância da localização das esquadrias na distribuição do escoamento de ar interno. Um dos mais importantes foi o estudo de Givoni (1976) que foi um dos pioneiros na área e que até hoje exerce influência sobre os trabalhos produzidos mais recentemente. Segundo esse autor, em um ambiente térreo com as janelas em paredes opostas, a velocidade do ar interno é mais alta para o vento a 45° do que para com o vento na perpendicular ao plano da janela. Já para janelas em paredes adjacentes, a velocidade média foi mais alta para o vento perpendicular à abertura (**Figura 9**).

Figura 9 – Efeito da localização das aberturas numa edificação térrea.



Fonte: GIVONI 1976, apud BITTENCOURT E CANDIDO (2008).

Em uma análise feita por Bittencourt e Candido (2008):

As pesquisas de Givoni (1976) sugerem que maiores médias na velocidade do ar são conseguidas em ambientes com aberturas localizadas em paredes adjacentes, para uma incidência perpendicular em relação à abertura de entrada. Para uma incidência a 45°, os resultados são ligeiramente reduzidos. Esta generalização, entretanto, não é partilhada por outros autores (AYNSLEY; MELBORNE; VICKERY, 1977; SOBIN, 1981), que afirmam que aberturas adjacentes só são eficientes se tiverem uma forma predominantemente horizontal.

Observa-se, a importância da existência de mais de uma abertura nos ambientes, seja em paredes opostas ou adjacentes para que ocorra a ventilação cruzada. Este fato, nem sempre

é observado por projetistas que muitas vezes dispõem apenas uma janela como abertura de entrada e a porta como abertura de saída, limitando a ventilação cruzada para os horários em que o usuário mantiver a porta aberta.

Outro fator importante é a localização de aberturas na altura do usuário, a fim de promover o resfriamento fisiológico e conseqüentemente o conforto térmico dos usuários. Neste sentido, é importante observar se a posição do usuário no ambiente é mais frequente em pé, sentado, como no caso de salas de aula, salas de estar e salas de jantar, ou deitado, como no caso dos quartos.

2.2 Métodos de avaliação do desempenho da ventilação natural em edificações

Os estudos relativos ao desempenho da ventilação natural são de natureza complexa, envolvendo fenômenos físicos da mecânica dos fluidos. A escolha do método de avaliação a ser utilizado vai depender do grau de precisão que se deseja obter, bem como dos recursos que estão disponíveis (BITTENCOURT, 1993).

Cálculos de previsão da ventilação natural confiáveis são importantes para um bom projeto arquitetônico, pois possibilitam avaliações preliminares das estratégias de ventilação que serão utilizadas nas edificações. Neste aspecto, as normas de desempenho além de contribuir para uma maior qualidade das edificações, podem auxiliar propondo parâmetros mais simples de avaliação, já que cálculos mais complexos se tornam muitas vezes inviáveis durante o processo projetual (LIDDAMENT, 1986).

Alguns autores dividem os métodos para calcular a ventilação nos edifícios em empíricos e teóricos, sendo os empíricos aqueles que derivam de alguma experiência com modelos físicos ou de medições em edifícios e os teóricos, baseados nos princípios físicos da ventilação (BITTENCOURT; CANDIDO, 2008, BITTENCOURT, 1993, LIDDAMENT, 1986). Em geral, existem modelos desenvolvidos para estimar taxa de ventilação em edificações, podendo ser modelos empíricos, modelos de zonas e modelos teóricos como os CFD's (SANTAMOURIS; KOLOKOTRONI, 2007).

Os modelos empíricos podem assumir várias funções como, por exemplo, cálculo de taxa de renovações do ar, estimativas do efeito do clima na ventilação (vento e temperatura) e estimativa do efeito da hermeticidade do edifício nas taxas de ventilação (LIDDAMENT, 1986).

Segundo Chen (2009), os modelos teóricos, também chamados de analíticos são provavelmente os modelos mais antigos para a predição do desempenho da ventilação natural, e não diferem muito dos modelos empíricos, pois ambos derivam de equações de conservação de massa, energia e de espécies químicas. Segundo o autor, a diferença é que os modelos empíricos utilizam, em geral, mais aproximações do que os teóricos.

Entre os modelos teóricos estão os programas computacionais que utilizam a Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD). São softwares desenvolvidos a partir das bases numéricas da dinâmica dos fluidos que além de fornecer dados quantitativos a partir de cálculos matemáticos de ventilação natural, também possibilitam avaliar diferentes modelos de projeto de edificações e sua influência nos padrões de escoamento da ventilação natural (BITTENCOURT; CANDIDO, 2008).

Os CFDs têm origem entre as décadas de 1960 e 1970, fruto do desenvolvimento da engenharia aeroespacial (ANDERSON, 1995). Os primeiros CFDs apresentavam seus resultados em fluxos bidimensionais, devido às limitações dos algoritmos e dos computadores da época. A partir da década de 1990, eles foram aperfeiçoados e seus resultados passaram a ter visualização tridimensional, estabelecendo-se como importantes ferramentas de projeto para a engenharia aeroespacial, mecânica, civil, naval e nas indústrias (SACRAMENTO, 2012).

De acordo com Asfour e Gadi (2007) os modelos CFD foram utilizados inicialmente para aplicações industriais, mas atualmente se tornaram uma ferramenta comum na simulação do desempenho térmico de edifícios. Trata-se de uma técnica poderosa na predição do movimento do ar e suas características (CIBSE, 1997 apud ASFOUR; GADI, 2007).

O modelo CFD é baseado no conceito de divisão de um domínio em subzonas e para cada uma delas são resolvidas equações de massa, momento e conservação de energia de acordo com o poder de processamento do computador utilizado. Em comparação com modelos matemáticos de ventilação natural, gera resultados mais detalhados (ASFOUR; GADI, 2007).

São baseados nas equações de Navier-Stokes para fluido viscoso e de escoamento incompressível. Descrevem o movimento tridimensional do ar em termos de velocidades instantâneas, temperatura (ou densidade) e pressão em um ponto. O edifício é dividido em volumes controlados e as equações são resolvidas a cada iteração (KOLOKOTRONI; HEISELBERG, 2015).

Segundo Kolokotroni e Heiselberg (2015), as principais aplicações dos modelos CFD para o estudo da ventilação natural são: cálculo da velocidade e temperatura em ambientes e

edifícios; cálculo do fluxo de ar no entorno, cálculo da distribuição dos campos de pressão nas superfícies (fachadas); análises paramétricas e cálculo das características do fluido através das aberturas.

Chen (2009) compara diversas ferramentas de avaliação da ventilação natural, sendo elas: modelos analíticos, modelos empíricos, modelos experimentais de pequena escala, modelos experimentais em escala real, modelos de rede multizona, modelos zonais e modelo de fluidodinâmica computacional (CFD), e constata que este último modelo é mais popular e contribui para 70% da literatura encontrada na pesquisa. Asfour e Gadi (2007) também afirmam que o uso de CFD é adequado para prever o comportamento da ventilação natural nos edifícios.

Segundo Glicksman e Tan (2005) o modelo CFD tem sido largamente utilizado e tem se tornado uma ferramenta mais confiável na análise térmica do interior das edificações e na qualidade do ar. Costa e Alucci (2011) avaliaram a viabilidade no uso de dinâmica dos fluidos computacional (CFD – Computational Fluid Dynamics) para a obtenção de coeficientes de pressão, e concluíram que o modelo CFD é uma alternativa viável em relação aos túneis de vento. Diversos outros autores já utilizaram o modelo CFD para estudos de ventilação natural em edifícios, tornando esta ferramenta amplamente praticada (STRAVAKAKIS *et al*, 2008, GAO; LEE, 2011, HOOFF; BLOCKEN, 2013, SACRAMENTO, 2012, AI; MAK, 2014).

No item a seguir, serão demonstrados alguns trabalhos desenvolvidos utilizando ferramentas computacionais para avaliação do desempenho da ventilação natural em edificações.

2.2.1 Simulação computacional como ferramenta de avaliação da ventilação natural: contribuições na área

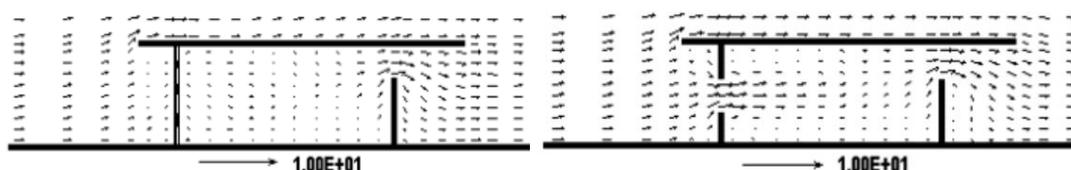
Akutsu *et al* (1998) analisaram as condições de ventilação natural de uma edificação em São Paulo, utilizando o programa ESP-r (Energy Simulation Program- research). O ESP-r é um software de simulação horária desenvolvido no exterior e trazido para o Brasil em 1992, em uma época em que as pesquisas com simulações do desempenho térmico de edificações começavam a se desenvolver nos laboratórios brasileiros (MENDES *et al*, 2013). As simulações mostraram que o mau posicionamento das aberturas em relação aos ventos pode prejudicar o desempenho térmico de uma habitação. Para os autores “a distribuição das janelas na fachada é um parâmetro fundamental na qualidade do ar interior dos ambientes de

um edifício.” O estudo foi feito avaliando os perfis da vazão de ar em m^3/s para cada ambiente nas diversas configurações simuladas.

Já no trabalho de Bittencourt e Lôbo (1999) a influência conjugada dos parâmetros localização e dimensão das aberturas em salas de aulas típicas foi investigada através de simulações computacionais utilizando o software PHOENICS, analisando as velocidades médias resultantes em cada ambiente. Foram simuladas salas de aula medindo 6 x 6m e altura de 3m. Quanto à localização das aberturas, foram consideradas três posições: na faixa baixa da parede (do piso até 1,0m), na faixa média (entre 1,00 e 2,00m) ou na faixa alta (de 2,00 até o teto).

Na **Figura 10** a seguir, observa-se na primeira imagem, um corte da sala com abertura de entrada com 1/13 da área do piso localizada na parte baixa e abertura de saída na parte de cima. Na segunda imagem, a abertura de entrada com 1/5 da área do piso na faixa central da fachada e abertura de saída também na parte superior.

Figura 10 – A influência da localização das aberturas no padrão do escoamento da ventilação natural nos ambientes.



Fonte: Bittencourt e Lôbo, 1999.

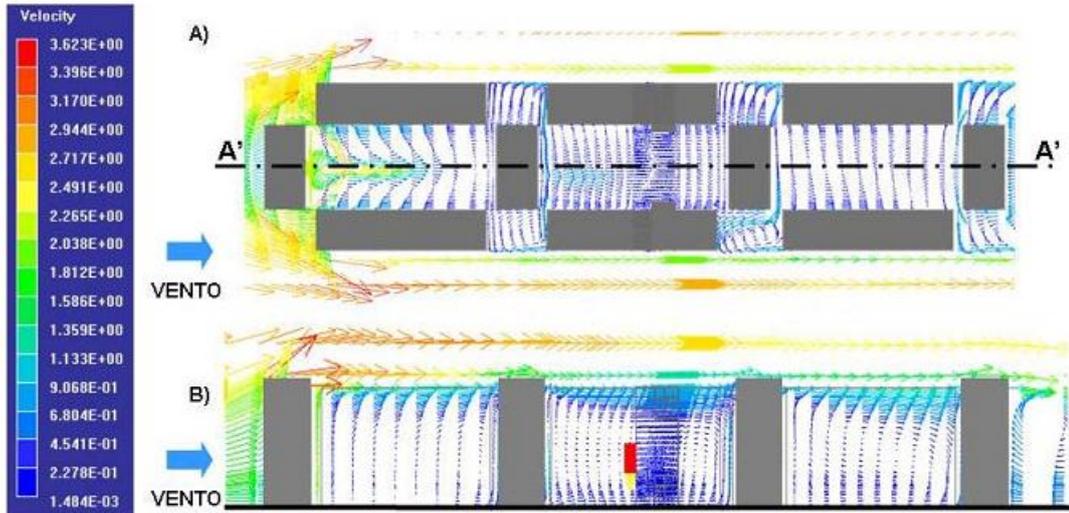
Foram considerados modelos com 1/13, 1/8, 1/6 e 1/5 da área do piso como aberturas de entrada. A abertura de saída foi considerada fixa com 1/6 do piso da sala. Foram consideradas as incidências de 90° e 45°. Estes parâmetros resultaram num total de 48 modelos computacionais. Os resultados mostraram que as maiores velocidades do ar foram alcançadas com aberturas de entrada na faixa média, associadas a maiores dimensões de aberturas. Entretanto, os autores constataram que a localização das aberturas tem maior influência sobre o padrão de distribuição do ar do que a dimensão das mesmas.

Ainda avaliando o efeito da forma e posicionamento das aberturas em edificações escolares, Bittencourt e Peixoto (1999) utilizaram o programa CFD PHOENICS 2.2.2 e variaram as aberturas nas formas horizontal, quadrada e vertical e nas posições: baixa (do piso até 1,0m), média (entre 1,00 e 2,00m) e alta (de 2,00 até o teto) em relação à altura da parede. Nesta pesquisa, foram consideradas duas incidências de vento: 90° e 45° e a área das aberturas foi considerada fixa em 1/6 em relação à área de piso da sala. Ao todo foram 36 modelos

simulados de uma sala típica, medido 6m x 6m x 3m de pé-direito. Os resultados mostraram que as aberturas de entrada no formato horizontal e localizadas na faixa média, conjugadas às saídas na faixa alta, apresentaram melhor resultado. Essa configuração proporcionou uma distribuição do fluxo de ar mais uniforme no ambiente, com velocidade média um pouco abaixo de 2m/s. Os autores afirmam ainda que a localização das aberturas exerce mais influência sobre a circulação do ar no interior de edificações escolares do que a variação da forma das mesmas.

Torres et al (2005) utilizaram o software PHOENICS 3.5 para avaliar a ventilação natural em um arranjo construtivo urbano na cidade de Maceió-AL. O objetivo foi avaliar a influência de arranjos construtivos urbanos na qualidade climática das edificações, em especial as condições de ventilação natural, estudando os atributos de desenho urbano e configuração espacial de um conjunto habitacional vertical. Os autores também realizaram a análise dos atributos da forma urbana segundo Oliveira (1988). Quanto às simulações da ventilação natural no conjunto, foram analisados o térreo e o 4º pavimento da edificação, com incidência dos ventos predominantes na cidade: Sudeste, Nordeste e Leste. As análises foram feitas em planta baixa a 1,50m do solo (**Figura 11 A**) e em corte (**Figura 11 B**) e as velocidades internas obtidas foram inferiores a 10% da velocidade do ar externa. Os autores constataram a inadequação do alinhamento dos edifícios mesmo que posicionados a favor dos ventos dominantes. A baixa porosidade do edifício e a localização das aberturas também foram apontadas como fatores determinantes na redução das velocidades do ar no interior dos ambientes (TORRES *et al*, 2005).

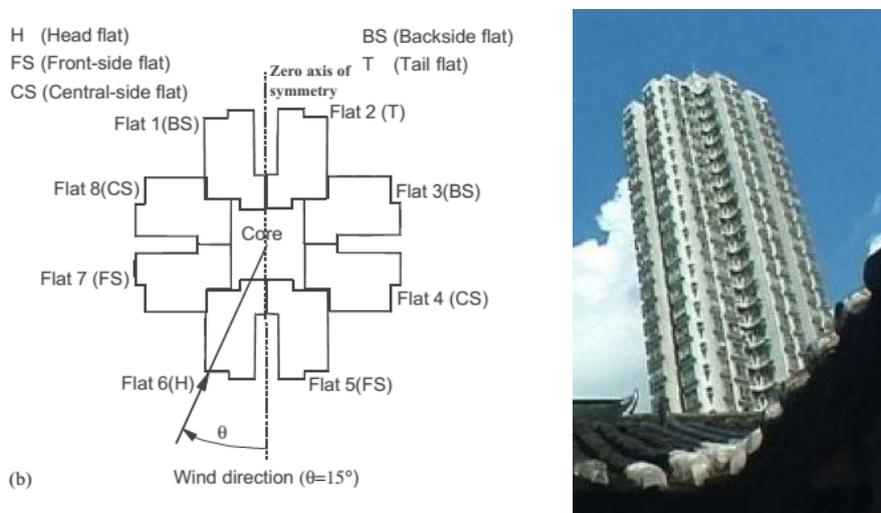
Figura 11 – Distribuição do fluxo de ar no arranjo construtivo para o vento Sudeste.



Fonte: TORRES *et al*, 2005.

Burnett *et al* (2005) realizaram um estudo através de simulações computacionais de uma edificação residencial de 30 pavimentos, típica de Hong Kong, utilizando o software FLUENT (**Figura 12**). O objetivo foi analisar o potencial que a ventilação natural teria no interior dos ambientes através da análise das pressões externas. Os autores verificaram que a ventilação cruzada pode ser potencializada com o leiaute adequado e correta orientação do edifício em relação aos ventos dominantes, além de localização satisfatória das janelas e dos ambientes dentro de cada unidade habitacional. O estudo concluiu que a direção predominante de 30° é a que gera uma ventilação cruzada mais eficiente para a maioria das unidades.

Figura 12 – Edificação residencial de 30 pavimentos, típica de Hong Kong.

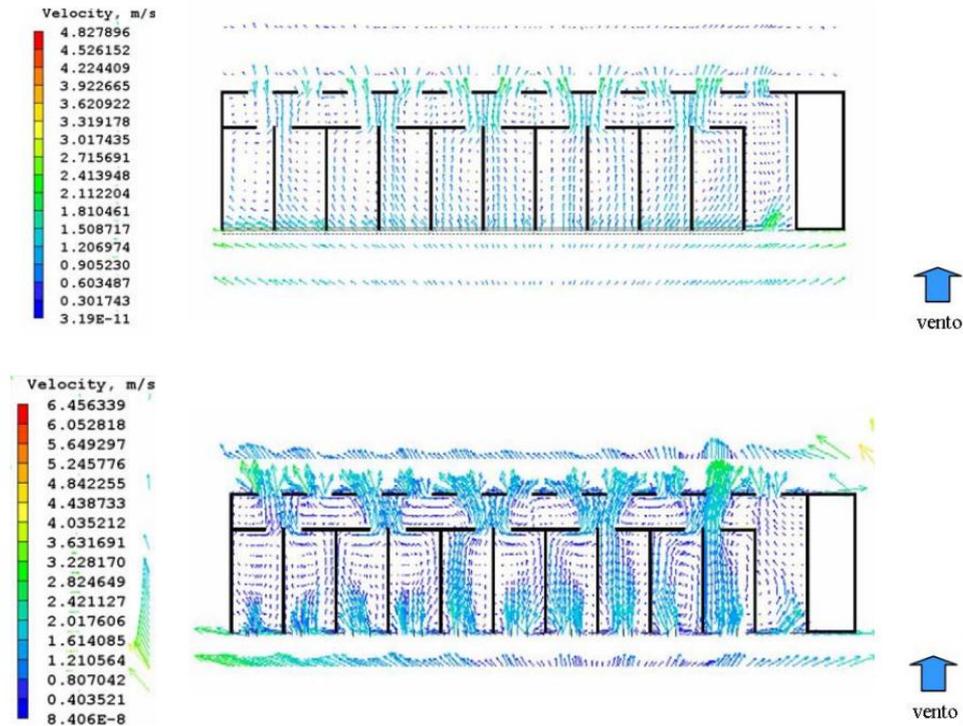


Fonte: Burnett *et al* (2005).

Candido (2006) investigou o impacto da escolha da tipologia da esquadria na distribuição do fluxo de ar em edifícios de escritório na cidade de Maceió-AL. As tipologias analisadas foram: correr, maxim-ar e pivô vertical e a análise foi feita com base em simulações computacionais no software PHOENICS 3.6 de uma edificação considerada típica. A autora considerou para todos os modelos simulados a mesma área de abertura em função das recomendações contidas no Código de Obras da cidade naquele ano (atualmente o Código de Urbanismo e Edificações não faz mais menção ao dimensionamento necessário para as aberturas, conforme será discutido no item 2.3.3).

A pesquisa constatou que a esquadria de correr concentra o fluxo de ar em função da abertura da esquadria. A esquadria maxim-ar se mostrou, muitas vezes, favorável a entrada do ar e distribuição mais uniforme do fluxo no interior dos ambientes em comparação com a janela de correr. A janela de pivô vertical apresentou os melhores resultados tanto em termos de distribuição quanto de velocidade do ar interna (**Figura 13**). Na primeira imagem com esquadrias de correr e na segunda imagem esquadria pivotante. Ambas com área de abertura de 12% da área do piso dos ambientes. A autora sugere que sejam adotados fatores de correção para diferentes tipologias de esquadrias além de uma revisão na área de abertura prescrita na época (CANDIDO, 2006).

Figura 13 – Efeito da escolha de diferentes tipologias de esquadrias no desempenho da ventilação natural em escritórios.



Fonte: Cândido (2006).

Hassan et al (2007) investigaram o efeito da localização e área das aberturas (em relação a área da fachada) e orientação do edifício em relação aos ventos predominantes no desempenho da ventilação natural nos ambientes. Foi utilizado ensaio em câmara de fumaça e simulações em CFD com o software ANSYS FLOTRAN. As duas técnicas se mostraram úteis em fornecer dados sobre o desempenho da ventilação natural no ambiente analisado. O modelo simulado foi um paralelograma de $100 \times 83 \times 26$ mm com oito aberturas, sendo quatro na fachada frontal e quatro na fachada posterior, onde foram simuladas diversas situações: todas abertas, todas fechadas, apenas uma aberta, dentre outras.

Os autores concluíram que o software é eficaz para simulações de ventilação natural em edifícios, pois os resultados demonstraram bastante semelhança entre as simulações e os dados obtidos no experimento. Além disto, em todos os casos simulados, o fluxo do vento nos casos com duas janelas abertas foi melhor do que nos casos com uma janela aberta apenas. Nos casos em que as aberturas se localizaram apenas em uma fachada a distribuição do vento foi melhor quando as janelas não estavam próximas uma da outra. Os resultados mostram a importância da existência de mais de uma abertura nos ambientes para que ocorra a ventilação cruzada.

Verdelho (2008) analisou o potencial de resfriamento provocado pela ventilação natural em edificações residenciais de Portugal para fins de conforto térmico. Para isto, a autora identificou os seguintes parâmetros que influenciam o desempenho dos sistemas de ventilação natural: área das aberturas, posicionamento das aberturas, área de aberturas interiores, orientação de fachadas e aberturas com relação aos ventos dominantes e inércia térmica da construção. Posteriormente realizou análises através dos softwares AIOLOS e LESOCOOL, para diferentes localizações do país, que permitiram caracterizar o potencial de arrefecimento por ventilação natural, resultando em recomendações de projeto.

As principais conclusões deste trabalho foram:

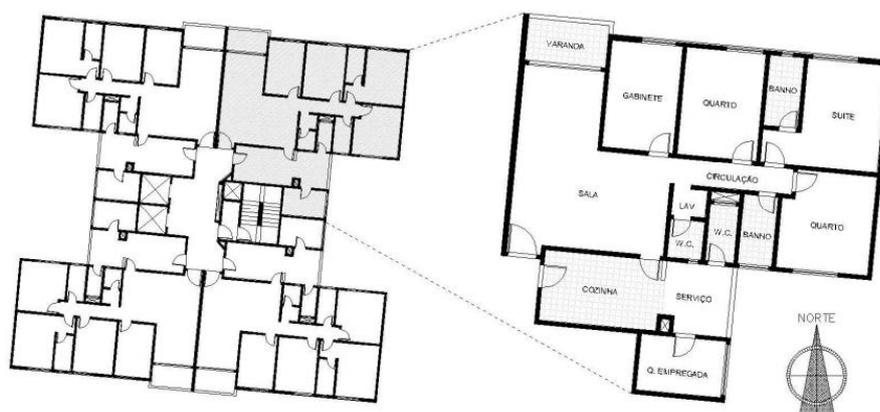
- o potencial de resfriamento é maior quando as aberturas estão situadas em fachadas adjacentes ou opostas do que quando se localizam na mesma fachada de um ambiente,
- a diminuição das áreas das aberturas produzem um potencial de resfriamento menor em 50% em relação a aberturas maiores, dependendo das condições de clima externo. Além disto, o controle das aberturas é essencial para garantir as condições de conforto dos usuários visto que em Portugal a variação de temperatura é grande.

Versage (2009) avaliou o desempenho térmico de edifícios verticais multifamiliares naturalmente ventilados na cidade de Campo Grande. Foram simulados diversos parâmetros de ventilação no Energy Plus observando sua influência no desempenho termoenergético do edifício. O autor utilizou o cálculo do número de graus hora de refrigeração para determinação do desempenho térmico do edifício, entretanto, não foram utilizados modelos de conforto térmico nem análise da aceitação do movimento do ar já que as simulações com o modelo de rede Airflow Network não calculam a velocidade do ar sobre as pessoas. O trabalho serviu de base para elaboração das recomendações presentes no RTQ-R.

Costa (2009) analisou o desempenho da ventilação natural no interior de edificações multifamiliares residenciais na cidade de Aracaju-SE. Para isto, utilizou a simulação computacional com o ANSYS CFX e escolheu um único apartamento de um edifício existente na cidade para as análises. Em todas as simulações foi utilizado o vento com incidência de 90° em relação à fachada do edifício e a velocidade de 4,5m/s. A autora variou a posição, dimensionamento e tipologia de aberturas, bem como a distribuição espacial interna, resultando em oito modelos diferentes conforme se apresenta a seguir:

- Modelo 1: o apartamento original considerando os vãos das janelas totalmente livres, ou seja, sem a interferências das esquadrias (**Figura 14**).
- Modelo 2: alteração da localização das aberturas dos quartos para fachada Leste, a fim de aproveitar melhor os ventos dominantes no local.
- Modelo 3: modelo similar ao original (modelo 1), com a colocação das esquadrias obstruindo parte dos vãos projetados.
- Modelo 4: modelo similar ao anterior porém com as portas internas fechadas.
- Modelo 5: modelo com as portas internas fechadas, porém com acréscimo de bandeiras acima das portas medindo 70x30cm.
- Modelo 6: modelo similar ao original (modelo1), com ampliação da sala em função da extinção do gabinete.
- Modelo 7: modelo similar ao original (modelo1), com ampliação das janelas dos quartos, ocupando toda a largura da parede onde as janelas foram projetadas.
- Modelo 8: modelo similar ao original (modelo1), com alteração na posição da porta de um dos quartos, a fim de favorecer a ventilação cruzada.

Figura 14 – Modelo original utilizado por Costa (2009).



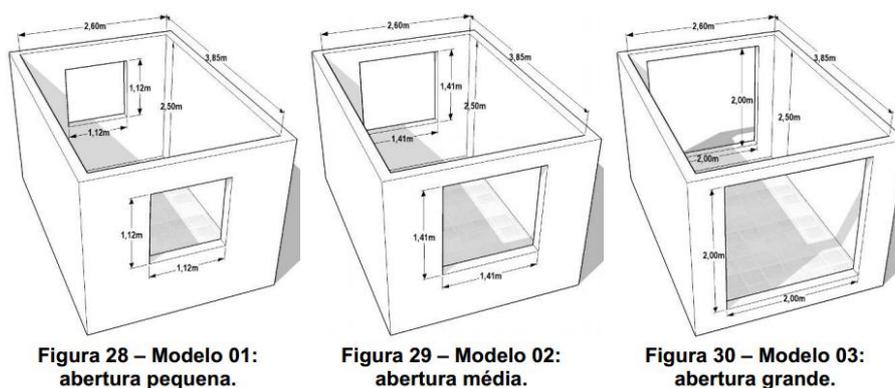
Fonte: COSTA, 2009.

Costa (2009) conclui que há uma tendência a acreditar que quanto maior a abertura, maior a qualidade na distribuição do fluxo e a velocidade do mesmo, entretanto acredita que a posição e tipologia das esquadrias influenciaram mais na distribuição do fluxo de ar interno do que o dimensionamento da abertura e a configuração interna. A autora conclui afirmando que dificilmente a análise isolada de apenas uma variável poderá responder efetivamente às

questões de ventilação natural nos edifícios, sendo a simulação computacional uma ferramenta poderosa no auxílio às decisões projetuais nesse sentido.

Cunha (2010) avaliou através de simulações computacionais com o ANSYS CFX, o desempenho da ventilação natural em modelos simplificados com diferentes configurações de aberturas e orientações. Os resultados foram comparados com métodos de avaliação existentes a fim de avaliar sua eficácia e aplicabilidade durante o processo projetual. O objeto de estudo foi um modelo resultante das recomendações do código de obras da cidade de Natal/RN, porém com as aberturas configuradas conforme a NBR 15220, sendo pequenas, médias e grandes (**Figura 15**). Os resultados mostraram que as variáveis mais importantes na potencialização da ventilação natural são o ângulo de incidência do vento e o dimensionamento das aberturas. A pesquisa evidenciou ainda a complexidade de agregar uma ferramenta CFD ao processo projetual e a demanda por um método capaz de gerar dados na mesma velocidade em que as ideias surgem.

Figura 15 – Diferentes configurações das aberturas simuladas por Cunha (2010): pequena ($1,25\text{m}^2$), média ($2,0\text{m}^2$) e grande ($4,0\text{m}^2$).



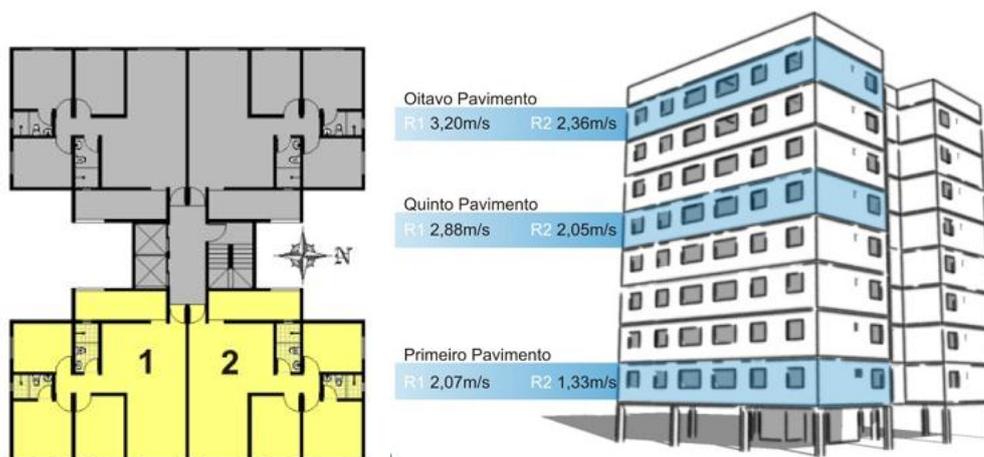
Fonte: Cunha, 2010.

Gao e Lee (2011) avaliaram a influência da configuração das aberturas em edificações residenciais de Hong Kong. Uma unidade residencial hipotética foi formulada para representar as residências da região analisada. Foram avaliados três parâmetros: localização das aberturas, orientação dos edifícios e localização das portas, através de simulações computacionais em CFD com o software AIRPAK que posteriormente foram validadas por um estudo de caso. No total foram 96 modelos simulados, modificando oito posições de janelas diferentes, quatro orientações diferentes do edifício e duas localizações de portas diferentes, além de três incidências de vento predominantes de acordo com dados do Ano Típico de Referência (TypicalWeatherYear – TWY). Os autores constataram que, uma vez fixada a dimensão das aberturas, a posição das janelas foi o que mais influenciou no desempenho da ventilação

natural no interior dos ambientes, seguido da orientação do edifício e em terceiro lugar a posição das portas. A melhor configuração encontrada foi aquela em que as aberturas de entrada e saída do ar se localizavam em paredes opostas, perpendiculares umas às outras.

Sacramento (2012) avaliou a influência da dimensão das aberturas de saída no potencial de ventilação natural em edificações multifamiliares residenciais em Maceió-AL. O autor variou o tamanho das aberturas em 10%, 15% e 20% em relação à área do piso e da seção média do ambiente, bem como a porosidade do entorno urbano, a rugosidade do terreno e a incidência do vento (45° e 90°). A avaliação do desempenho da ventilação natural foi feita com base em análises paramétricas de modelos computacionais realizadas com auxílio do software PHOENICS, (CFD). O potencial de ventilação natural de cada configuração simulada foi avaliado através do cálculo do coeficiente de ventilação (CV). O CV foi obtido através da velocidade média do ar nos ambientes estimado com o auxílio do software, comparado com a velocidade do vento externo na mesma altura, para cada pavimento analisado (**Figura 16**).

Figura 16 – Modelo utilizado por Sacramento (2012) em sua pesquisa: planta baixa e perspectiva mostrando os pavimentos analisados.

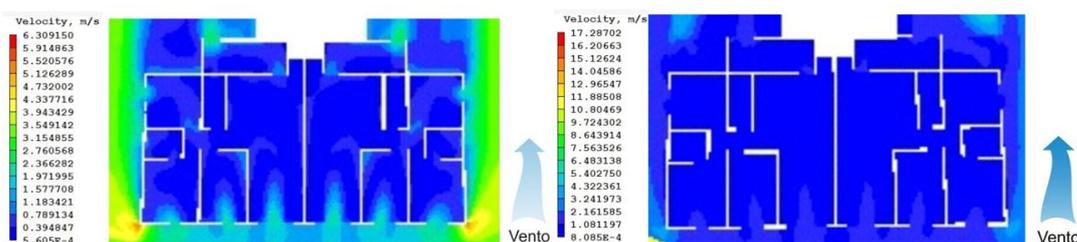


Fonte: Sacramento, 2012.

O autor verificou o potencial de ventilação dos ambientes do edifício sob dois aspectos: em relação a qualidade do ar, verificando o atendimento do número mínimo de trocas de ar por hora, e em relação ao conforto térmico, verificando se as velocidades do ar internas seriam capazes de proporcionar condições de conforto aos usuários. Neste último caso, o autor considerou os valores de temperatura e umidade em fevereiro, mês que apresentou a maior média das máximas da temperatura do ar, de acordo com dados climáticos extraídos do software AnalysisBio.

De acordo com a pesquisa, todos os ambientes alcançaram as trocas de ar necessárias, inclusive aqueles com as menores dimensões de aberturas. Entretanto, nos modelos com área de abertura de 10% em relação a área do piso (menores aberturas), ocorreu uma variação de apenas 5,56% a 11,12% dos 156 ambientes analisados que restituíram o conforto pela ventilação. Já nos modelos com área de abertura maior (25% da área do piso do ambiente), de 89% a 100% dos ambientes alcançaram essas condições de conforto (**Figura 17**).

Figura 17 - Planta baixa do pavimento 1 com vento a 90°. Na imagem com abertura com 10% da área do piso e na segunda com 25% da seção média (a pior e a melhor situação simulada).

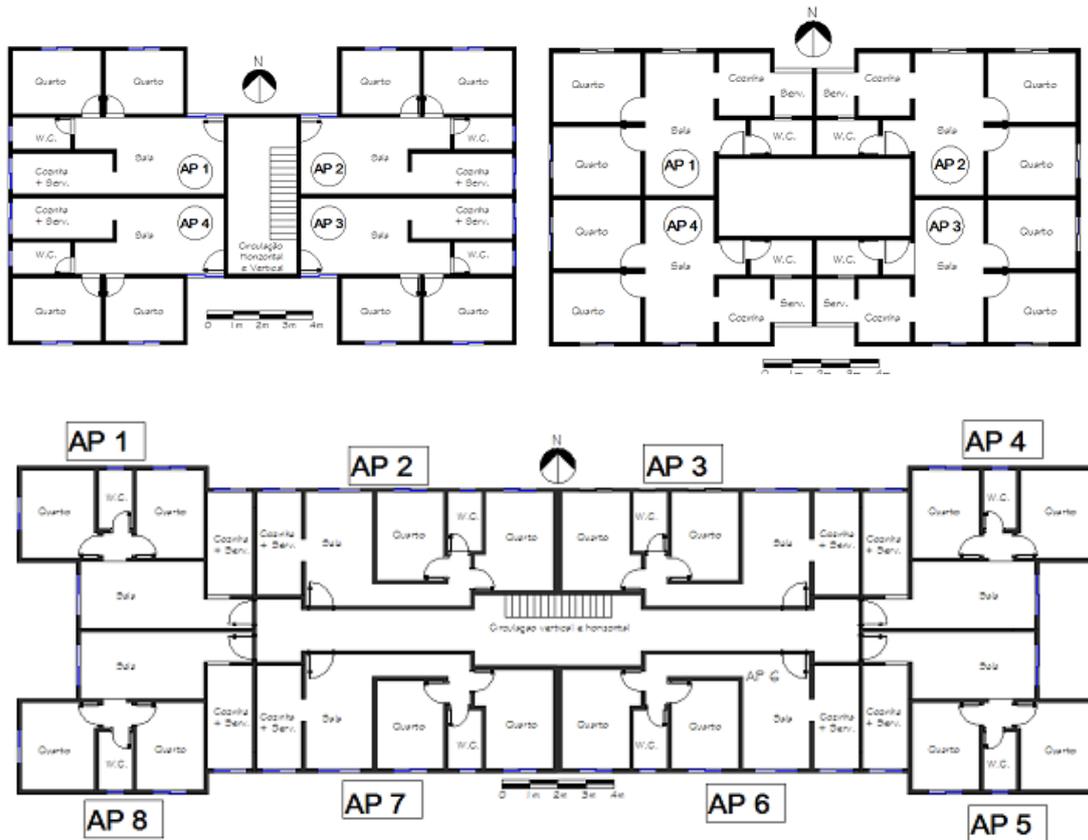


Fonte: SACRAMENTO, 2012.

De maneira geral, o autor aponta que a variação na dimensão das aberturas de saída apresenta influência no potencial de ventilação dos ambientes internos na edificação analisada e ressalta a complexidade do fenômeno da ventilação natural nos edifícios, visto a grande quantidade de parâmetros que o envolve. O autor sugere que seja estudada a relação entre as aberturas de entrada e de saída do vento da unidade habitacional, no potencial de ventilação, assim como a influência da dimensão e da quantidade de aberturas intermediárias no potencial de ventilação.

Morais (2013) avaliou três tipologias arquitetônicas diferentes de projetos do programa “minha casa minha vida” na cidade de Campinas, do ponto de vista da ventilação natural: planta do bloco em formato “H”, planta em formato quadrado e planta em formato retangular (**Figura 18**). Três incidências de vento foram analisadas: 90°, 135° e 0° em relação ao plano das aberturas, através de simulações no software ANSYS CFX. A autora analisou os dados em três alturas de plano horizontal: 1,5m, 6,5m e 11,5m do solo e criou uma escala de conforto de acordo com Candido (2010), para classificar as velocidades do ar encontradas internamente aos modelos.

Figura 18 – Tipologias avaliadas por Morais em sua tese de doutorado.

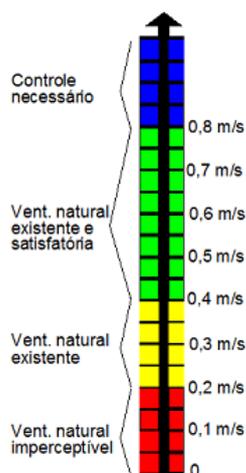


Fonte: MORAIS, 2013.

A escala cromática de velocidade criada por Morais se divide em quatro níveis de velocidades médias:

- de 0 à 0,2m/s onde a ventilação natural é imperceptível (cor vermelha);
- de 0,21 à 0,4 m/s se caracteriza como ventilação natural existente (cor amarela);
- de 0,41 à 0,8m/s ventilação natural satisfatória (com redução da carga térmica, cor verde);
- e acima de 0,80m/s onde há necessidade de controle por parte do usuário, pois nestas velocidades o vento pode levantar papéis, roupas, assanhar cabelos, e derrubar objetos (cor azul) (**Figura 19**) (MORAIS, 2013).

Figura 19 – Escala cromática de velocidades do ar em relação ao conforto térmico dos usuários segundo Candido (2010).



Fonte: Morais, 2013.

A autora comparou as velocidades obtidas nos três modelos segundo essa escala e concluiu que o modelo em formato “H” tem maior potencial de proporcionar conforto térmico e que as aberturas localizadas nas reentrâncias do edifício têm papel fundamental na obtenção desses índices. A tipologia em formato quadrado obteve o segundo melhor desempenho e a tipologia retangular obteve o pior desempenho devido a sua fachada monolítica, ou seja, sem reentrâncias ou recortes (MORAIS, 2013).

A avaliação realizada por Morais (2013) se constitui numa importante contribuição à literatura da área, pois traz uma avaliação conjunta de diversos parâmetros que afetam o desempenho da ventilação natural tais como forma do edifício, localização e dimensionamento das aberturas e incidência dos ventos predominantes. Porém a autora foca apenas na configuração original dos edifícios sem, no entanto, modificar parâmetros para perceber a influência de cada um no desempenho da ventilação natural. Além disto, o trabalho de Morais confirma a baixa qualidade dos empreendimentos habitacionais brasileiros, do ponto de vista do desempenho térmico e mais especificamente do aproveitamento da ventilação natural.

Sahabuddin e Gonzalez-Longo (2015) realizaram uma análise comparativa através de simulações em ambiente CFD entre uma residência tradicional da Malásia e um edifício residencial atual, de programas sociais do governo (**Figura 20**).

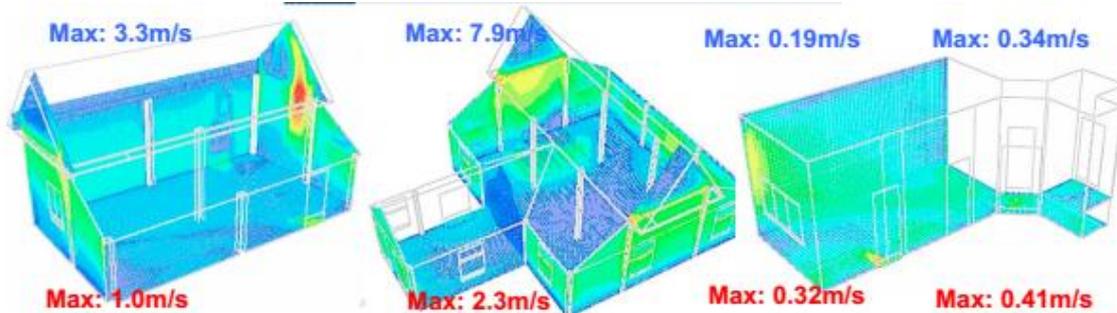
Figura 20 –Habitação tradicional na Malásia e programa de habitação do governo.



Fonte: Sahabuddin e Gonzalez-Longo (2015)

Os resultados mostraram que o edifício do governo possui apenas 9,8% de área de abertura em comparação aos 20,3% da casa tradicional, considerando a sala e a cozinha nos dois projetos. Além disto, as simulações mostraram que os índices de velocidade do vento são bem maiores nas tipologias tradicionais avaliadas (**Figura 21**).

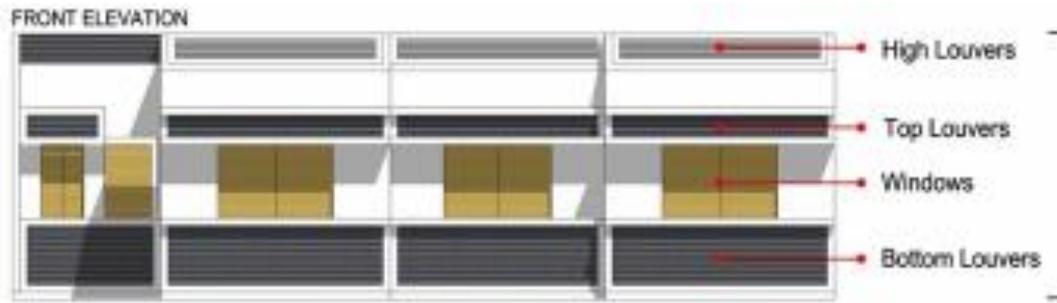
Figura 21 – Imagens das simulações realizadas em duas edificações tradicionais e na proposta pelo governo para habitação popular.



Fonte: Sahabuddin e Gonzalez-Longo (2015)

Com base nos resultados, os autores propuseram um modelo de habitação, utilizando o conceito da casa tradicional e acrescentando mais janelas e venezianas para incrementar a ventilação natural, aumentando a área total de aberturas para ventilação em relação ao projeto do governo (**Figura 22**).

Figura 22 – Proposta dos autores para residência na Malásia.

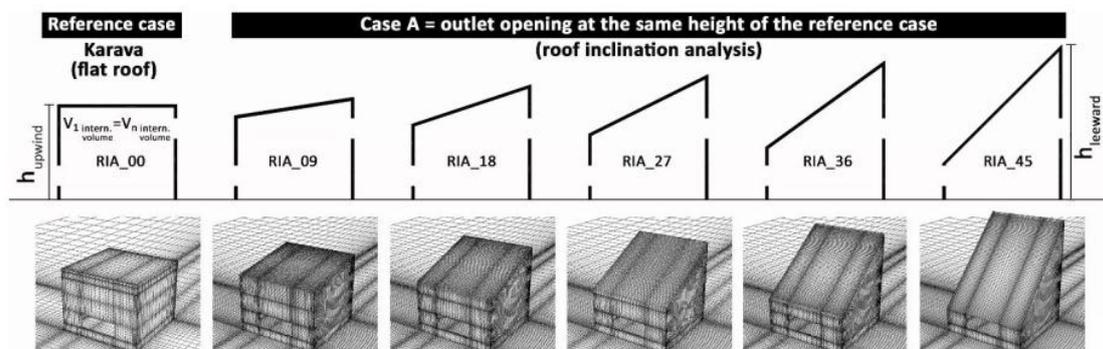


Fonte: Sahabuddin e Gonzalez-Longo (2015)

O projeto proposto pelos autores além de aumentar a área disponível para ventilação natural ainda proporciona a ventilação na altura do usuário através das venezianas localizadas no peitoril, possibilitando o fluxo de ar mesmo com as janelas fechadas. As “top louvers” e “high louvers” também podem ser utilizadas com as janelas fechadas, garantindo privacidade sem perder a ventilação natural, além de auxiliar na remoção do ar quente.

Péren *et al* (2015) avaliaram a influência da geometria do telhado e da posição da abertura de saída no desempenho da ventilação natural em edificações. Os autores fizeram uma revisão de literatura e constataram que a maioria dos trabalhos de ventilação natural foca em edificações com telhado plano e aberturas de entrada e saída em posições simétricas. Os autores utilizaram simulações em ambiente CFD e medições em tuneis de vento para verificar os efeitos de diferentes configurações destes dois parâmetros em um modelo de ambiente único.

Figura 23 – Variações na inclinação do telhado simuladas por Péren et al(2015).

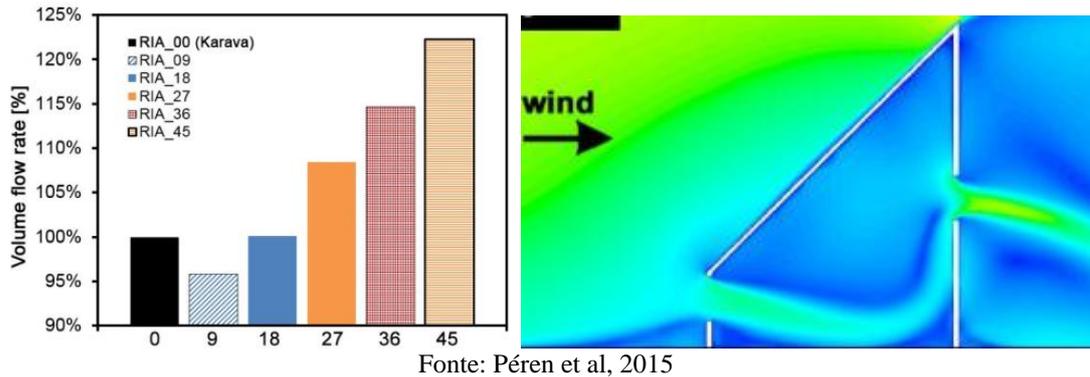


Fonte: Péren et al, 2015

Foram simuladas cinco ângulos de inclinação diferentes em relação a normal 0°: 9°, 18°, 27°, 36° e 45° (**Figura 23**). Os cinco modelos possuíam inicialmente mesma posição e tamanho das aberturas. Em um segundo momento, foram modificadas as posições da abertura

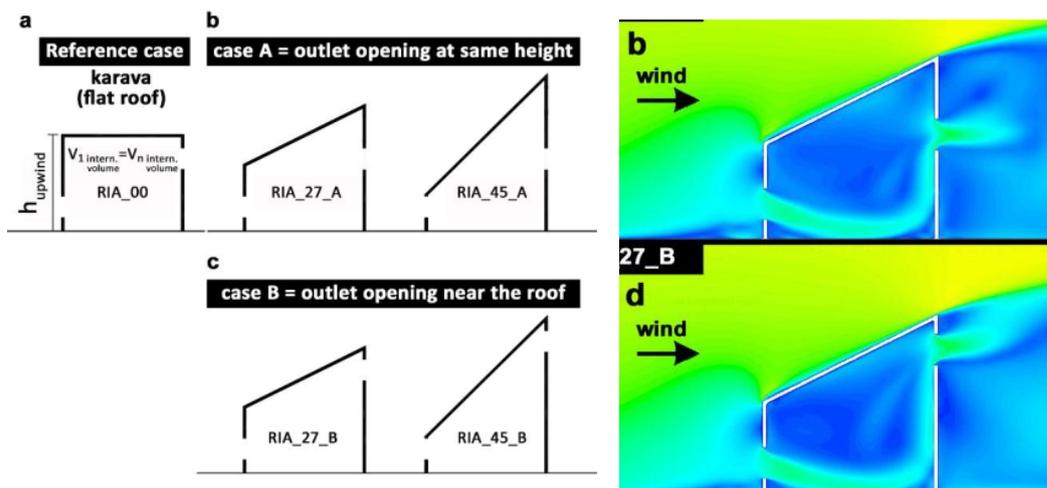
de saída em relação ao eixo vertical. Os resultados mostraram que a inclinação do telhado tem grande influência na distribuição dos ventos no interior dos ambientes, pois a vazão do ar aumentou a partir de 18° de inclinação com o consequente aumento da velocidade do ar interno, sendo ainda maiores nos modelos com telhado mais inclinado (**Figura 24**).

Figura 24 – Resultados das simulações com cinco inclinações de telhados diferentes. A partir de 18° aumenta o volume de ar no ambiente conforme aumenta a inclinação.



Por outro lado, nas configurações analisadas, a localização na vertical da abertura de saída (**Figura 25**) exerceu pouca influencia sobre o padrão de escoamento, tendo aumentado a velocidade do ar em apenas 4%.

Figura 25 –Variações de localização da abertura de saída simuladas e parte dos resultados das simulações em CFD.

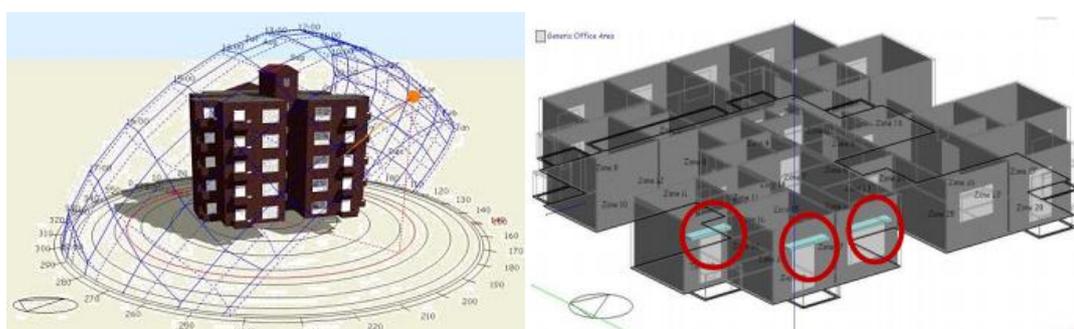


Fonte: Péren et al, 2015

Elshafei et al (2017) investigaram a influência da configuração das aberturas na velocidade e temperatura do ar nos ambientes internos de um edifício residencial. Os parâmetros modificados foram: dimensão, localização e implantação de protetores solares nas aberturas. Os autores utilizaram simulações no *Energy Plus* e no código CFD do *Design*

Builder e compararam os resultados de antes das modificações com os resultados obtidos após o aumento, mudança na localização e acréscimo de protetores. As janelas da cozinha e do banheiro tiveram um acréscimo de 64% e a janela da sala aumentou em 40%. Protetores foram adicionados às janelas da sala e dos quartos (**Figura 26**). Medições experimentais foram utilizadas para validar as simulações. Os resultados apresentaram uma diminuição de 2,5% na temperatura do ar e um aumento de seis vezes na velocidade do ar após as modificações realizadas.

Figura 26 – Edifício analisado por Elshafei *et al* (2017) e protetores acrescentados ao às janelas do modelo.



Fonte: ELSHAFEI *et al*, 2017.

2.2.2 Síntese das contribuições analisadas

Segundo Costa (2009) o uso de simulações computacionais para análise de desempenho de edificações e ambiente urbano é relativamente novo no Brasil, já que na Europa essa prática ocorre há cerca de 30 anos. Apesar disto, foi possível verificar na revisão de literatura, que a simulação em ambiente CFD vem sendo largamente utilizada tanto no cenário nacional quanto internacional, sendo os programas PHOENICS e Ansys CFX os mais utilizados nas pesquisas publicadas.

Quanto aos parâmetros analisados nos trabalhos, verifica-se que a simulação considerando diferentes orientações e o efeito da localização das aberturas em relação à direção predominante dos ventos está quase sempre presente nas pesquisas, justamente por ser um fator de impacto significativo na distribuição das correntes de ar no interior dos edifícios.

A análise das diferenças de pressão nas superfícies de um edifício permite a escolha adequada da localização das aberturas de entrada e saída nas fachadas do mesmo. Ao mesmo tempo, a localização das aberturas em relação ao ambiente determina a distribuição do escoamento do ar naquele espaço. A escolha da localização deve, portanto, levar em

consideração uma análise tanto externa quanto interna, a fim de proporcionar maior conforto aos usuários.

Verifica-se, de maneira geral, a importância das características do projeto das esquadrias para promover a ventilação natural. Dentre as contribuições trazidas nesta seção do trabalho, apresenta-se a seguir, um resumo daquelas mais relacionados com esta tese (**Quadro 1**).

Quadro 1 – Resumo das principais contribuições relacionadas ao tema da tese.

Autor (Ano)	Principais contribuições
Akutsu et al (1998)	A localização das esquadrias na fachada é fundamental na qualidade do ar interno.
Bittencourt e Lôbo (1999)	A localização das esquadrias exerceu mais influência do que a dimensão na velocidade média do ar interno.
Bittencourt e Peixoto (1999)	A localização das esquadrias exerceu mais influência do que a forma na velocidade média do ar interno.
Costa (2009)	A localização e a tipologia influenciaram mais os resultados do que a dimensão e a configuração interna.
Cunha (2010)	O ângulo de incidência dos ventos e a dimensão das aberturas foram os fatores mais decisivos nos resultados.
Elshafei et al (2017)	Mudanças na localização, aumento das esquadrias e inclusão de protetores causaram diminuição de 2,5% na temperatura do ar e aumento de seis vezes na velocidade do ar .
Gao e Lee (2011)	A melhor configuração encontrada foi aquela em que as aberturas de entrada e saída do ar se localizavam em paredes opostas, perpendiculares umas as outras .
Hassan et al (2007)	A importância de adotar mais de uma abertura por ambiente para promover a ventilação cruzada .
Sacramento (2012)	As maiores aberturas obtiveram melhores resultados (25% da área do piso).
Sahabuddin e Gonzalez-Longo (2015)	Sugestão de uso de venezianas para controlar o escoamento do ar e promover ventilação na altura dos usuários.

Fonte: Elaborado pela autora.

Constata-se, portanto, a relevância da análise da configuração das aberturas para o desempenho da ventilação natural, visto que este aspecto está presente em diversas pesquisas no Brasil e no mundo. Para uma mesma área de abertura, a localização das esquadrias foi apontada, por alguns autores, como a variável que mais influencia a velocidade do ar interno, principalmente quando se considera a incidência dos ventos predominantes do local. Apesar disto, este é um parâmetro ausente nas normas brasileiras de desempenho atuais. A dimensão das aberturas, por outro lado, também foi um parâmetro frequente nas pesquisas e apesar de atualmente estar contemplado nas Normas Brasileiras, não há um consenso nas diversas recomendações das referidas Normas, conforme será abordado a seguir.

Observa-se ainda, que a maioria das pesquisas traz análises paramétricas envolvendo mais de uma variável, tais como posição, dimensionamento, tipologia, incidência dos ventos, dentre outras, mostrando que o desempenho da ventilação natural depende da associação destas variáveis e não de apenas uma isoladamente, como é tratado na maioria das normas e códigos.

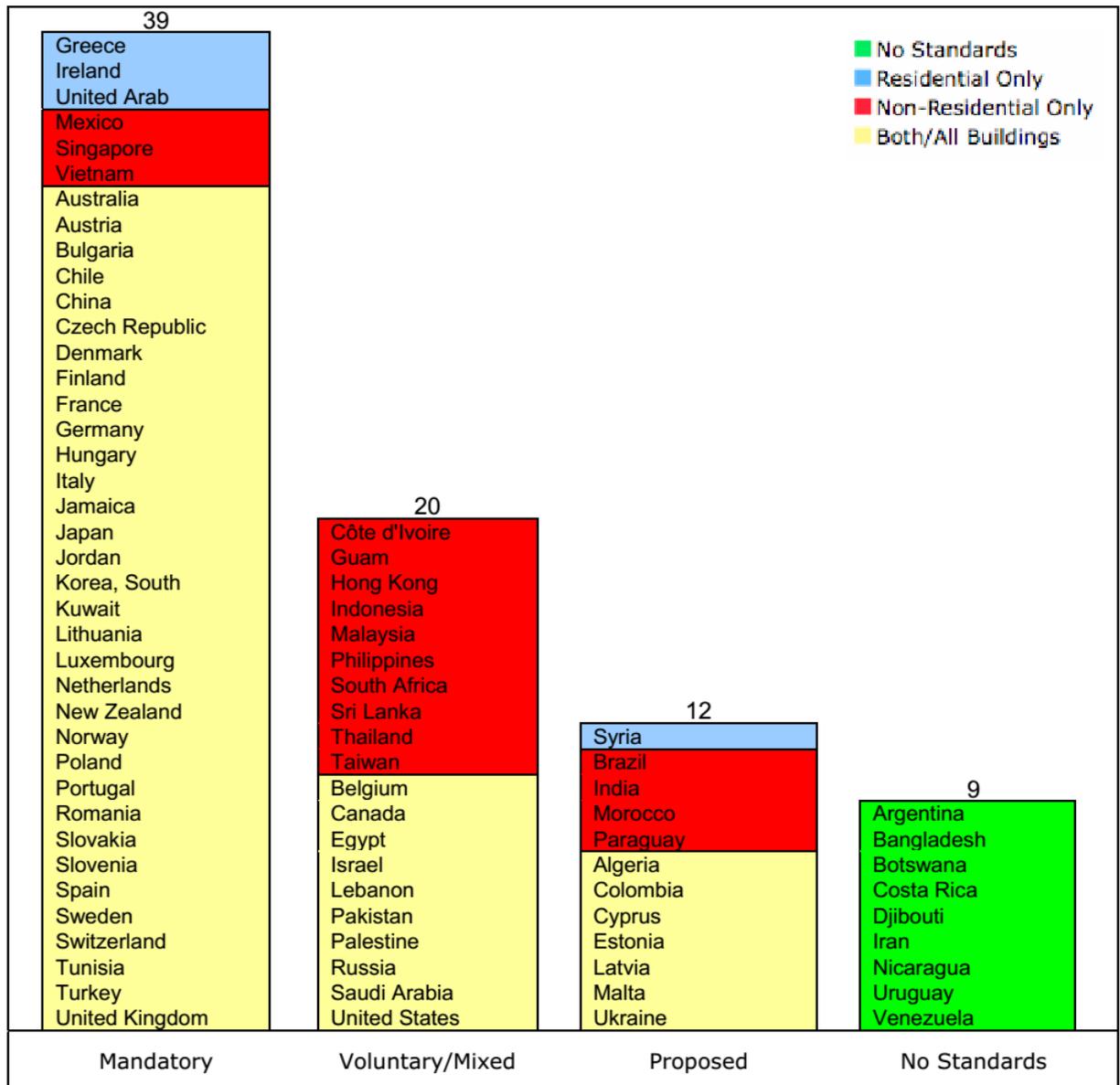
Por fim, a adequada configuração das aberturas é um fator determinante para que se obtenham bons resultados no aproveitamento da ventilação natural nos edifícios. Apesar disto, ainda são poucas as publicações sobre o assunto, havendo muitas lacunas no conhecimento, como nas normas de avaliação da ventilação natural nos edifícios, que será o tema do próximo item.

2.3 Normatização e a ventilação natural em edifícios residenciais: potencialidades e limitações

As normas são instrumentos essenciais na construção civil, pois visam garantir níveis mínimos de segurança, estanqueidade e desempenho. As questões relacionadas ao desempenho térmico e energético das edificações estão cada vez mais presentes nas Normas buscando promover uma maior satisfação dos usuários e economia de energia nos edifícios.

Muitos países possuem normas de desempenho dos edifícios ou Códigos de Edificações que são válidos em todo território nacional (como nos Estados Unidos). Além disto, tem crescido nos últimos anos o número de países com regulamentos para obter níveis mínimos de eficiência energética em edificações – tanto comerciais quanto residenciais – implementados ou em vias de implementação, principalmente entre 1994 a 2007 (**Figura 27**). (JANDA, 2008).

Figura 27 – Situação dos regulamentos de eficiência energética em 80 países analisados.



Fonte: JANDA, 2008.

A fim de alcançar os propósitos desta tese, serão consideradas como “Normas” nesta seção, qualquer conjunto de recomendações, regulamentos, leis, decretos, códigos, regras, ou Normas, propriamente ditas, que contenham diretrizes para o uso da ventilação natural em edificações. A seguir serão abordados alguns desses documentos de países que disponibilizam esse material na internet. O foco da abordagem foi a ventilação natural em edificações residenciais.

2.3.1 Austrália

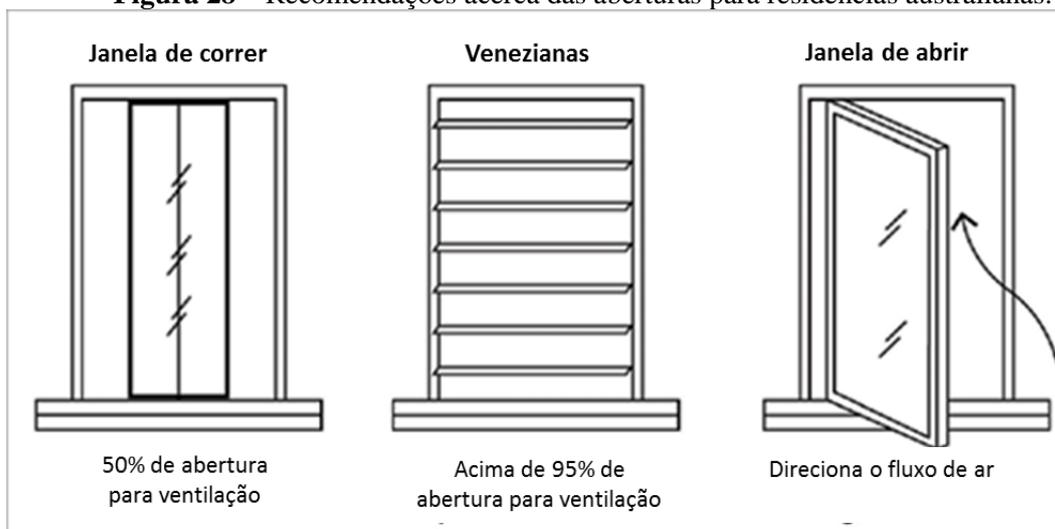
O Governo Australiano possui um sistema que avalia a eficiência energética de residências de acordo com o projeto arquitetônico. O Nationwide House Energy Rating Scheme (NATHERS, 2017) estima, através de um programa computacional, o potencial de aquecimento e refrigeração da casa de acordo com o clima local, atribuindo a classificação de vai de 0 a 10 estrelas. A classificação leva em consideração aspectos como: *layout* da residência, construção do seu telhado, paredes, janelas e piso, tamanho e especificação das aberturas, orientação das janelas proporcionando sombreamento e ventilação através das brisas locais. Também são levados em conta os materiais construtivos da edificação, o tipo de construção, a orientação do edifício, bem como sua localização.

Uma classificação com zero estrela significa que o invólucro do edifício praticamente não reduz o desconforto do clima quente ou frio. Uma classificação de seis estrelas indica bom, mas não excelente desempenho térmico. Os ocupantes de uma residência classificada com 10 estrelas provavelmente não precisariam de resfriamento ou aquecimento artificial. Uma residência pode ser avaliada antes ou depois de ser construída. O consumo de energia por sistemas de água quente, luzes ou eletrodomésticos não é considerado na classificação porque esses acessórios são normalmente substituídos várias vezes durante a vida útil do prédio (NATHERS, 2017).

Há informações com acesso público e gratuito aos usuários, tendo como público alvo os construtores e arquitetos, em um site com diversas recomendações para construção de residências ambientalmente sustentáveis, com base na avaliação feita pelo NatHERS (Nationwide House Energy Rating Scheme). O “Your Home” é um desses sites e contém desde informações climáticas sobre cada região do país, até orientações sobre a escolha dos materiais e estratégias bioclimáticas recomendadas.

As recomendações para uso da ventilação natural incluem as possíveis estratégias de ventilação como ventilação cruzada, ventilação noturna, resfriamento evaporativo, entre outras, bem como esclarecimentos a respeito da importância da escolha das aberturas (**Figura 28**). A avaliação da ventilação natural, assim como de outros aspectos do conforto térmico é realizada por meio de um software próprio que calcula a velocidade do ar gerada a partir de diferenças de pressão e também através do efeito chaminé e compara com valores determinados por pesquisas como confortáveis para a maioria das pessoas.

Figura 28 – Recomendações acerca das aberturas para residências australianas.



Fonte: adaptado de REARDON, 2013.

Além do NatHERS, existe ainda na Austrália o NABERS – National Australian Built Environment Rating System – que também é um sistema de avaliação da performance ambiental das edificações do país, porém mais voltado para edificações comerciais. O NABERS avalia a eficiência energética, gestão da água, gestão de resíduos e qualidade do ambiente interno e seu impacto no meio ambiente. Sua classificação vai de 1 a 6 estrelas sendo 3 um desempenho considerado médio.

2.3.2 Portugal

O Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios (RCCTE), aprovado em 1990, foi o primeiro instrumento legal em Portugal que impôs requisitos ao projeto de novos edifícios. O objetivo do Regulamento é garantir a satisfação das condições de conforto térmico nesses edifícios sem necessidades excessivas de energia, quer no Inverno quer no Verão. Em paralelo, o RCCTE visa também minimizar efeitos patológicos nas construções, derivados das condensações superficiais e no interior dos elementos da envoltória. Entretanto, desde 1990 muitas mudanças foram necessárias e o Regulamento foi remodelado, sendo publicada uma nova versão que entrou em vigor em 2006.

O RTCCE considera alguns parâmetros como fundamentais para caracterização das necessidades de energia do edifício: necessidade de energia para aquecimento, para refrigeração, para aquecimento de águas sanitárias e energia primária. Além destes parâmetros, o RTCCE considera como complementares os seguintes aspectos: propriedades térmicas dos materiais da envoltória, incluindo transmitância, inércia térmica e fator solar dos

vidros e taxa de renovação de ar. Impõe limites ao consumo energético para climatização e produção de águas quentes, com enfoque muito claro no incentivo à utilização de sistemas eficientes e de fontes energéticas alternativas.

O regulamento faz recomendações em termos de renovações de ar por hora para os ambientes residenciais, classificando-os como espaços fortemente ventilados, fracamente ventilados e não ventilados. Segundo o regulamento, espaços fortemente ventilados são aqueles em que há aberturas que permitem a renovação do ar com uma taxa média de no mínimo seis renovações por hora. Assim, espaços fracamente ventilados seriam aqueles em que a taxa média de renovação do ar seria de 0,5 a 6 renovações de ar por hora e espaços não ventilados aqueles que não dispõem de ventilação permanente e taxa de renovação de ar inferior a meia renovação por hora (PORTUGAL, 2013).

Entende-se esses valores como sendo valores mínimos para higienização dos ambientes, já que o regulamento não leva em consideração nem o volume dos ambientes para fazer essa classificação. Há também em vigor no país, uma norma que regulamenta o uso do gás no interior das edificações, com recomendações semelhantes focadas na qualidade do ar interno (NP 1037-1, 2002).

2.3.3 Japão

De acordo com Sawachi e Tajima (2008) existem três tipos de recomendações para ventilação em edificações japonesas. Primeiramente, se a edificação possuir ventilação mecânica a taxa de ventilação deve ser de no mínimo $20 \text{ m}^3/\text{h}$ e se for utilizada apenas a ventilação natural as aberturas devem ter no mínimo $1/20$ da área de piso dos ambientes. Em segundo lugar, nos ambientes onde é utilizado fogo, deve-se prover ventilação na proporção da quantidade de gás gerado durante a combustão. A terceira recomendação diz respeito a salubridade do ar interno visto que uma pesquisa nacional revelou que a concentração de formaldeído estava consideravelmente alta nas habitações japonesas. Isto levou a uma revisão do Código de Edificações a fim de combater o que ficou conhecido como “sick house”, nos anos de 2002 e 2003.

Além destas recomendações, sabe-se que o país possui regulamentação própria para eficiência energética, o CASBEE – Comprehensive Assessment System for Built Environment Efficiency. Trata-se de um método de avaliação e classificação do desempenho de edifícios considerando práticas e equipamentos que diminuem o consumo energético do edifício. O CASBEE possui cinco faixas de classificação: Superior (S), Muito bom (A), Bom

(B+), Levemente carente (B-) e carente (C). Entretanto não foi encontrada nenhuma recomendação em relação à ventilação natural, apenas diretrizes em relação aos materiais e sistemas artificiais de condicionamento.

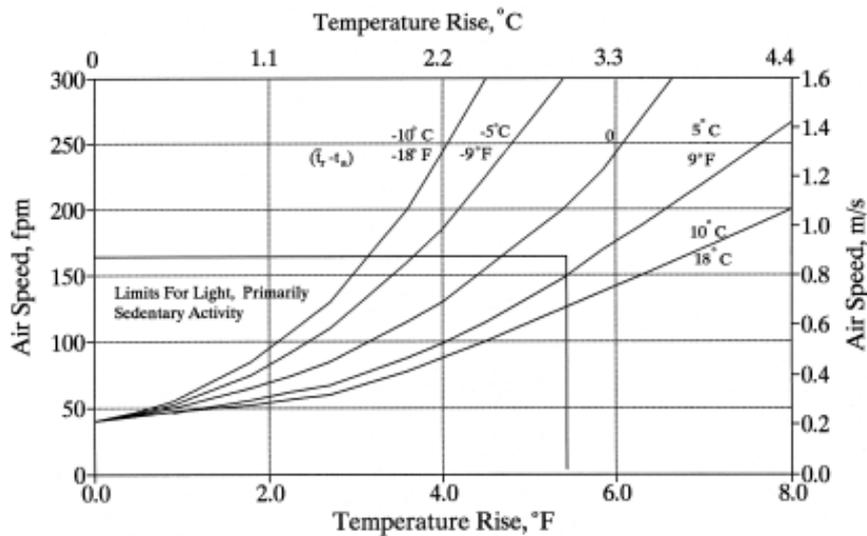
2.3.4 Estados Unidos

Nos Estados Unidos os trabalhos da ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) são o grande referencial. Portanto, serão abordadas a ASHRAE 55 e a *Standard* 90.2, além do International Building Code.

A ASHRAE 55 (2004) foi publicada pela primeira vez em 1966, mas vem sofrendo atualizações periodicamente. Segundo Brager; De Dear (2001) a ASHRAE 55 foi desenvolvida inicialmente para edifícios climatizados artificialmente. Entretanto, desde a incorporação do modelo adaptativo de conforto, a norma traz diretrizes também para edifícios ventilados naturalmente.

Segundo a ASHRAE 55 (2004) a velocidade do ar pode favorecer a obtenção de conforto térmico, fazendo com que os usuários aceitem temperaturas mais elevadas (temperatura do ar e temperatura radiante média), entretanto, a velocidade do ar não deve ultrapassar 0,8m/s (ASHRAE, 2004) (**Figura 29**).

Figura 29 – Velocidade do ar necessária para expandir os limites para temperaturas aceitáveis.



Fonte: ASHRAE, 2004.

A ASHRAE 55 (2004) se baseia no modelo adaptativo de conforto proposto por De Dear e Brager (1998) para estabelecer condições mínimas de conforto térmico a serem

alcançadas nos espaços internos. A norma americana traz um método de avaliação específico para ambientes ventilados naturalmente, onde os usuários fazem o controle não apenas da vestimenta e da atividade que estão executando, mas também do ambiente em que se encontram, controlando, por exemplo, o funcionamento de esquadrias. Os limites superiores de temperatura da zona de conforto proposta podem ser alterados em função da velocidade do ar.

A *Standard 90 – Energy Conservation in New Building Design* foi a primeira norma de eficiência energética em edificações, elaborada como parte do programa dos EUA de incentivo à eficiência energética. Ela evoluiu para a *Standard 90.1*, para edificações não-residenciais e a *Standard 90.2*, para edificações residenciais (ASHRAE, 2004 *apud* CARLO, 2008).

A *Standard 90.2* aplica-se a edificações residenciais unifamiliares e multifamiliares. Regulamenta tanto a envoltória quanto os sistemas e equipamentos inerentes a ela e que implicam no consumo de energia. Prevê duas formas de cumprimento: Método Prescritivo e Método do Custo Energético Anual, sendo que o primeiro prevê compensações para alguns casos. Em relação à envoltória possui requisitos mínimos para forro, pisos e paredes. O método prescritivo inclui análise da transmitância térmica, resistência térmica e coeficiente de sombreamento. A norma estabelece, também, uma limitação para a área de aberturas, que não pode ser superior a $11,5\text{m}^2$ (DILKIN, 2000).

Além da ASHRAE, existem Normas construtivas americanas como o International Building Code que traz recomendações quanto às aberturas em locais onde a salubridade pode ser comprometida como garagens, locais com fumaça, etc. Para estes locais apenas, são feitas recomendações mínimas de área de abertura em relação à área da fachada externa. (EUA, 2009)

2.3.5 Brasil

As Normas de desempenho térmico buscam estabelecer critérios mínimos para as edificações. No Brasil, a normatização do desempenho térmico se iniciou com a publicação em 2005 da NBR 15.220 que trazia recomendações para a construção de habitações de interesse social com base no Zoneamento Bioclimático Brasileiro sendo posteriormente atualizada e republicada (ABNT, 2005).

Segundo Sorgato *et al* (2013) devido ao fato desta Norma ser direcionada a Habitações de Interesse Social, iniciou-se o desenvolvimento da NBR 15.575 que trataria de edificações

residenciais de maneira geral. A primeira versão desta NBR foi publicada em 2008 e em 2013 sua versão mais recente entrou em vigor com alguns ajustes. A NBR 15.575 estabelece critérios mínimos de desempenho térmico, acústico e lumínico quanto aos materiais de vedação que compõem o edifício.

Por se tratarem de desempenho do edifício para todas as cidades do país, as duas Normas citadas não tratam da ventilação natural de maneira específica. Em geral, apenas fornecem recomendações quanto à área de abertura dos compartimentos. Sabe-se, entretanto, que o Brasil é composto por diversas realidades climáticas e que mesmo quando tais características são conhecidas, há ainda que se considerar aspectos locais como a topografia, o relevo e o entorno na avaliação da ventilação natural.

Alguns trabalhos vêm sendo desenvolvidos no intuito de analisar as recomendações das Normas aplicando-as às diversas realidades climáticas do país. Alguns deles serão abordados a seguir.

Tibiriça e Ferraz (2005) fizeram uma pesquisa acerca das normas existentes na construção civil que fornecesse recomendações acerca das janelas. Em uma abordagem integrada sobre a janela propuseram um modelo para o estudo sistêmico e a organização sistemática do elemento, considerando aspectos como: desempenho, valor, qualidade, percepção e tendências. Segundo os autores:

Com referência ao componente janela, existem no Brasil duas normas: a NBR 10821 (Caixilhos para edificação) e a NBR 7199 (Projeto, execução e aplicação de vidros na construção civil). A primeira estabelece as condições de desempenho dos caixilhos das janelas, exigíveis para edificações para uso residencial e comercial; a segunda, fixando as condições que devem ser obedecidas no projeto de envidraçamento em construção civil, aplica-se a envidraçamento de janelas, portas, divisões de ambientes, guichês, vitrines, lanternins, sheds e clarabóias.

Bastos *et al* (2007) analisaram o Zoneamento Bioclimático proposto pela NBR 15.220-3 (ABNT, 2005) e concluíram que o potencial eólico de cada região não foi considerado. Os autores utilizaram dados publicados nos Atlas eólicos de 2001 e 2005 além de características de rugosidade dos terrenos para propor um mapa de distribuição dos ventos sobrepondo-o ao Mapa do Zoneamento Bioclimático proposto pela NBR. Verificaram, portanto, que a Norma não considera as diferenças regionais em relação à ventilação natural e que o zoneamento proposto, apesar de representar uma iniciativa interessante, pode ocasionar erros de projeto em algumas regiões.

Loura *et al* (2011) realizaram a análise de uma edificação residencial multifamiliar localizada na cidade do Rio de Janeiro utilizando o método normativo simplificado proposta

pela NBR 15.575:2008 e o método prescritivo proposto pelo RTQ-R e compararam as duas análises. Foram identificadas divergências entre os métodos como, por exemplo, em relação a exigência de proteção solar em todos os ambientes de permanência prolongada. Sendo assim o edifício em questão obteve nível “B” segundo o RTQ-R enquanto de acordo com a NBR não alcançaria sequer o nível mínimo exigido. Os autores apontam para a necessidade de maior coerência entre os métodos avaliativos.

No Brasil não existem ainda Normas de Conforto Térmico que estabeleçam critérios mínimos quanto à ventilação natural e temperaturas do ar. Por isto, serão abordadas nesta subseção as Normas Brasileiras de desempenho térmico em vigor bem como os Regulamentos Técnicos da Qualidade do Nível de Eficiência Energética publicados pelo INMETRO.

A NBR 15.220 (ABNT, 2005) lança diretrizes para construção de habitações de interesse social de acordo com a Zona Bioclimática em que os municípios se localizam. Para a Zona Bioclimática oito, Zona onde a cidade de Maceió está inserida, as principais recomendações são: ventilação cruzada e proteção solar. Sobre as aberturas, a Norma recomenda apenas que o tamanho delas seja maior ou igual a 40% da área do piso do ambiente.

Esta relação não considera, por exemplo, a distribuição das aberturas no ambiente, o tipo de esquadria, a necessidade de aberturas de entrada e abertura de saída, a tipologia da esquadria. Tampouco, considera a velocidade e direção predominante dos ventos locais fatores imprescindíveis para se promover uma ventilação adequada.

A NBR 15.575 (ABNT, 2013) determina que as habitações devem apresentar aberturas nas fachadas, “com dimensões adequadas para proporcionar a ventilação interna dos ambientes” e estabelece uma relação entre a área da abertura e a área do piso do ambiente para cada Zona Bioclimática, assim como a NBR 15.220, porém com algumas divergências.

Para as Zonas Bioclimáticas de 1 a 7 a NBR 15.575 recomenda que a área de abertura seja maior ou igual a 7% da área do piso do ambiente. Para a Zona oito a NBR recomenda que esta proporção seja maior ou igual a 12% para a região Norte do país e maior ou igual a 8% tanto na região Nordeste quanto na região Sudeste (**Quadro 2**).

Quadro 2 – Recomendações das Normas Brasileiras em relação à área de abertura para ventilação de acordo com a Zona Bioclimática.

NBR 15.222 (ABNT, 2005)	
Zonas Bioclimáticas de 1 a 6	Médias (15% < Área da Abertura < 25% da área do piso do ambiente).
Zona Bioclimática 7	Pequenas (10% < Área da Abertura < 15% da área do piso do ambiente).
Zona Bioclimática 8	Grandes (Área da Abertura > 40% da área do piso do ambiente).
NBR 15.575 (ABNT, 2013)	
Zonas Bioclimáticas de 1 a 7	Médias (Área da Abertura ≥ 7% da área do piso do ambiente)
Zona Bioclimática 8	Grandes (Área da Abertura ≥ 12% da área do piso do ambiente) para cidades da Região Norte do Brasil.
	Grandes (Área da Abertura ≥ 8% da área do piso do ambiente) para cidades da Região Nordeste e Sudeste do Brasil.

Fonte: Adaptado de ABNT, 2005 e ABNT, 2013.

Percebe-se que há uma generalização das estratégias para cidades com necessidade diferentes como é o caso daquelas localizadas na Zona Bioclimática 8 que é bastante extensa e inclui cidades com características climáticas variadas. Da mesma forma, todas as cidades incluídas nas zonas de 1 a 7 possuem a mesma exigência para área de abertura para ventilação de acordo com a NBR 15.575.

Enquanto a NBR 15.575 considera aberturas médias para as Zonas de 1 a 7, a NBR 15.220 recomenda que as aberturas para ventilação na Zona sete sejam pequenas, considerando “pequenas” as aberturas com área entre 10% a 15% da área do piso em contradição com as aberturas “médias” de 7% da área do piso da NBR 15.575. Para a zona oito a NBR 15.575 sugere 12% da área do piso.

Além disto, este índice é bastante inferior ao recomendado pela NBR 15.220 (ABNT, 2005) que é de 40% da área de piso para a Zona Bioclimática oito, por exemplo, e não faz referências à tipologia das esquadrias ou orientação das mesmas. Tais divergências e generalizações indicam a necessidade de revisão das Normas Brasileiras e de estudos localizados que apontem alternativas para cada cidade de acordo com o clima local.

Por outro lado, os regulamentos de eficiência energética lançados pelo INMETRO (BRASIL, 2009; 2012), representam um grande passo para a construção de edifícios mais eficientes no campo da gestão da energia. Entretanto, ainda apresentam significativas limitações, principalmente na análise da ventilação natural como estratégia para redução de

consumo de energia na maioria das Zonas Bioclimáticas do país. Isto ocorre, entre outros fatores, devido à complexidade que envolve o estudo da ventilação natural.

Como esta tese está direcionada às edificações residenciais, serão analisadas as recomendações do RTQ-R para este tipo de edificação. O RTQ-R avalia a ventilação natural na análise de pré-requisitos e nas bonificações. Como pré-requisito considera a ventilação em três aspectos: percentual de área mínima de abertura efetiva para ventilação em ambientes de permanência prolongada, banheiros com ventilação natural e ventilação cruzada na unidade habitacional atendendo a proporção de 25%. Entretanto, a avaliação destes aspectos apenas não assegura o bom desempenho da ventilação natural no interior da edificação.

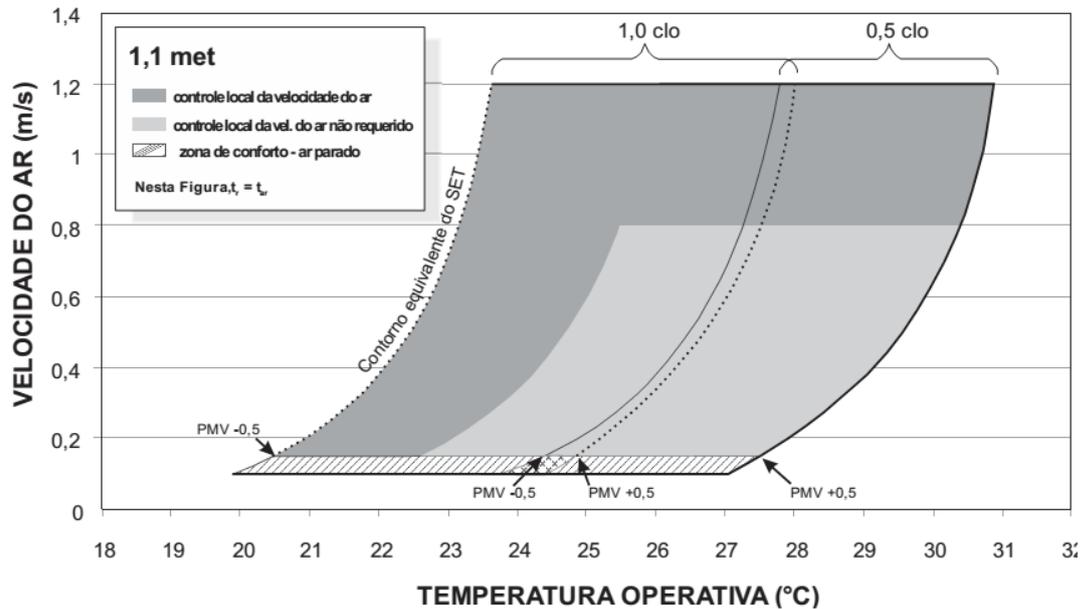
O percentual de área mínima, por exemplo, não garante a adequada orientação das esquadrias nem a distribuição das correntes de ar no ambiente. A ventilação cruzada, quando fora da proporção indicada (25%) também não é considerada tornando-se um ponto negativo na avaliação, segundo o RTQ-R.

Apesar de ser uma forma de avaliação mais detalhada do que aquela presente nas Normas Brasileiras, e considerar outros aspectos além da área de abertura para ventilação em relação à área do piso, tais como a ventilação cruzada e a ventilação de banheiros, verifica-se que ainda são necessários alguns ajustes para que se tenha um método avaliativo mais preciso em relação à ventilação natural nas edificações.

Além de normas do Ministério do Trabalho, que fixam limites máximos de temperatura e o tempo a que uma pessoa pode se expor em seu ambiente de trabalho, desenvolvendo suas atividades, ainda não existem normas de conforto térmico em edificações no Brasil. Por este motivo, Lamberts et al (2013) desenvolveram um novo projeto de norma brasileira, com base na norma ASHRAE 55 (2004), apresentando algumas mudanças estruturais e complementações, que visam a melhor compreensão, organização dos métodos de avaliação e procedimentos complementares.

A proposta de norma aceita limites de velocidade do ar elevadas para estender os limites de temperatura operativa do ar aceitáveis para o conforto térmico (Figura 5). “Os limites são impostos em função do ambiente, fatores pessoais e da existência ou não do controle local da velocidade do ar para os ocupantes do ambiente” (LAMBERTS, et al, 2013).

Figura 30 – Variação aceitável de temperaturas operativas a velocidades do ar para a zona de conforto, para uma razão de umidade de 0,010.



Fonte: LAMBERTS et al, 2013.

2.4 Síntese da Fundamentação Teórica

A ventilação natural é uma estratégia de projeto que além de ser fundamental para promover a salubridade dos ambientes, pode promover o conforto térmico e a economia de energia, em especial em cidades de clima quente como no Brasil.

Através da fundamentação teórica foi possível perceber que a configuração das aberturas está presente em diversas pesquisas no Brasil e no mundo, sendo este um dos principais aspectos a influenciar o desempenho da ventilação natural nas edificações. Verificou-se que apesar de ser um tema atual e relevante, ainda são poucos os trabalhos como o de Moraes (2013) e Sacramento (2012), por exemplo, que investigam a ventilação natural de maneira conjunta, ou seja, em toda a edificação e não apenas em um ambiente ou unidade habitacional, observando os efeitos de diversas variáveis simultaneamente.

Além destes, destaca-se o trabalho de Costa (2009) que apesar de ter se limitado a uma unidade habitacional apenas, observou a influência de diversos aspectos como dimensionamento, localização das esquadrias, configuração espacial interna e porosidade das portas internas, mostrando a importância de uma avaliação integrada das características da edificação que interferem na ventilação natural e não apenas baseada no dimensionamento das esquadrias. Segundo Elshafei et al (2017) modificações no tamanho, localização das aberturas e inclusão de protetores solares próximos as janelas podem reduzir o incremento da temperatura do ar interna e aumentar a velocidade média do ar, ressaltando a importância de

trabalhos como o que este tese apresenta, para proporcionar edificações mais confortáveis aos usuários e com menor consumo de energia.

Além disto, apesar de várias pesquisas existentes na área, as normas, regulamentos e códigos brasileiros ainda não avaliam de maneira eficiente as edificações quanto à ventilação natural, como se pôde observar no item 2.3. As diretrizes das normas brasileiras são divergentes quanto à área de abertura das janelas e não são muito claras ou até mesmo negligenciam outros aspectos, deixando a cargo do projetista, decisões importantes que podem comprometer o conforto dos usuários.

No cenário internacional, a maioria das normas de desempenho de edificações, traz recomendações quanto a taxas de renovações de ar por hora ou concentração máxima de poluentes nos ambientes. Isto ocorre entre outros fatores porque, na época em que essas normas foram elaboradas, a qualidade do ar interna era tida como principal função da ventilação. Dentre os países analisados, a Austrália é o que, aparentemente, dá mais importância para utilização da ventilação natural em edificações residenciais como forma de torná-las mais eficientes energeticamente, apontando estratégias de aproveitamento das brisas dominantes.

Sendo o Brasil um país de clima tropical, no qual a ventilação natural é uma das principais estratégias de projeto, destaca-se a necessidade de pesquisas que busquem avaliar o efeito das variáveis que interferem no desempenho da ventilação natural em edificações, de forma a desenvolver diretrizes normativas mais consistentes quanto ao projeto de aberturas. Assim, os projetistas poderão ter informações mais precisas de como aproveitar melhor esse recurso natural nos projetos arquitetônicos promovendo o conforto dos usuários e a eficiência energética.

Dentre as ferramentas existentes para avaliar a ventilação natural nas edificações, a fundamentação teórica mostrou que os modelos numéricos vêm sendo cada vez mais utilizados, através das simulações computacionais principalmente em ambiente CFD. As simulações computacionais em algumas pesquisas aparecem em conjunto com medições ou ensaios em túneis de vento que, em todos os casos analisados, confirmam os dados obtidos nas simulações, sugerindo que as ferramentas baseadas em CFD são eficazes para previsão do comportamento da ventilação natural em edificações.

3 MÉTODO

O método proposto fundamenta-se na análise comparativa de modelos com diferentes configurações, analisando qualitativa e quantitativamente os efeitos de cada parâmetro escolhido, no desempenho da ventilação natural.

Conforme discutido na seção 2.2 deste trabalho, as ferramentas CFD (*Computer Fluid Dynamics*) vêm sendo largamente utilizadas por pesquisadores na análise da ventilação natural. Sua aplicação permite controlar todas as variáveis envolvidas na questão investigada, se apresentando como uma ferramenta indicada para a realização de análises paramétricas e permitindo a identificação dos efeitos produzidos por cada um dos parâmetros examinados (HOOFF; BLOCKEN, 2013; TRINDADE, *et al*, 2010; BITTENCOURT, 1993).

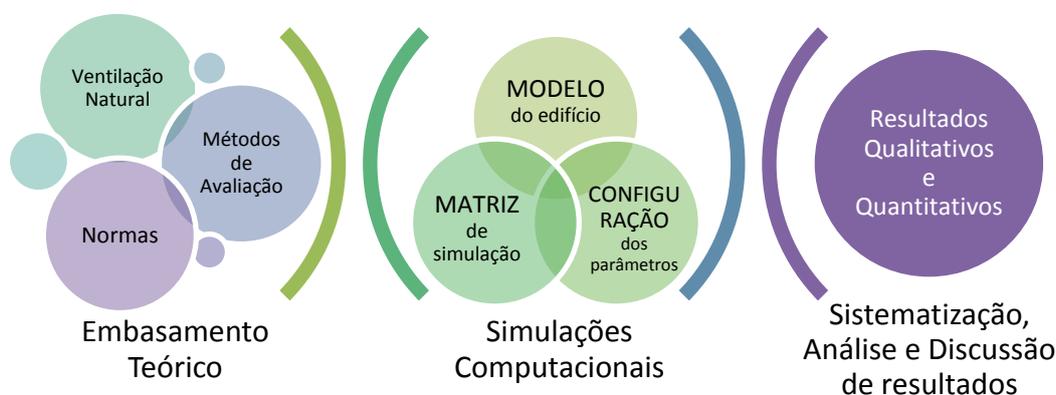
Por este motivo, optou-se por utilizar uma ferramenta CFD para a análise do impacto produzido por diferentes configurações de aberturas no comportamento da ventilação natural em edificações residenciais multifamiliares. O software escolhido foi o *PHOENICS*, produzido pela CHAM na sua versão 3.6.1, cuja licença está disponível no Laboratório de Conforto Ambiental da Universidade Federal de Alagoas.

Para a elaboração dos modelos a serem simulados e o desenvolvimento das simulações computacionais, outras etapas são necessárias tais como:

- Definição e caracterização do modelo a ser simulado,
- Definição dos parâmetros a serem investigados e elaboração da matriz de simulações,
- Configuração dos parâmetros de relaxamento e demais dados de entrada do programa;
- Simulações computacionais;
- Sistematização, análise e discussão dos resultados obtidos;

Tais procedimentos serão descritos a seguir e estão demonstrados esquematicamente na **Figura 31**.

Figura 31 – Esquema ilustrativo das etapas metodológicas do trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.1 Escolha e caracterização do modelo

Para alcançar os objetivos da tese, foi necessária a construção de um modelo de um edifício residencial a partir do qual as análises paramétricas serão desenvolvidas. Devido a complexidade do fenômeno e a fim de isolar as diversas variáveis que interferem na ventilação natural, a maioria dos estudos considera um ambiente isolado nas simulações, como afirmam Gao e Lee (2011):

Although much research work has been done on openings configurations, most previous studies were based on simple single room model. Factors such as interactive effects of doors' positions, multi-room characteristics of residential units, building orientation and prevailing wind conditions do not appear to have been considered adequately. (GAO; LEE, 2011)

Neste sentido, Viegas (1996) define que a ventilação conjunta acontece quando existem aberturas permanentes de entrada e saída do ar que permitem a comunicação de todos os ambientes da unidade habitacional sem que haja separação por setores. A ventilação conjunta, portanto, considera diversas variáveis que influenciam na ventilação natural de maneira simultânea, além da comunicação existente entre os ambientes de uma edificação. Ocorre na maioria das edificações habitacionais brasileiras e, portanto, é a que se pretende trabalhar nesta tese.

Para definir qual seria o modelo de habitação multifamiliar, foram considerados os seguintes aspectos: **1)** possibilidade de analisar diferentes configurações de área de abertura, porosidade das portas, ventilação cruzada, incidência e velocidade do vento; **2)** representatividade do modelo em cidades brasileiras, para que este estudo possa ter uma maior aplicabilidade.

Com relação à representatividade do modelo em cidades brasileiras, Triana *et al* (2015) definiram cinco tipologias de projeto residencial representativas do país com base na análise de 108 projetos arquitetônicos de empreendimentos brasileiros do Programa “Minha Casa , Minha Vida”. As tipologias resultantes desta análise foram: casa simples, casa geminada, apartamento típico para faixa de renda 1 em formato H, apartamento típico para faixa de renda 2 em formato H³ e apartamento em formato linear.

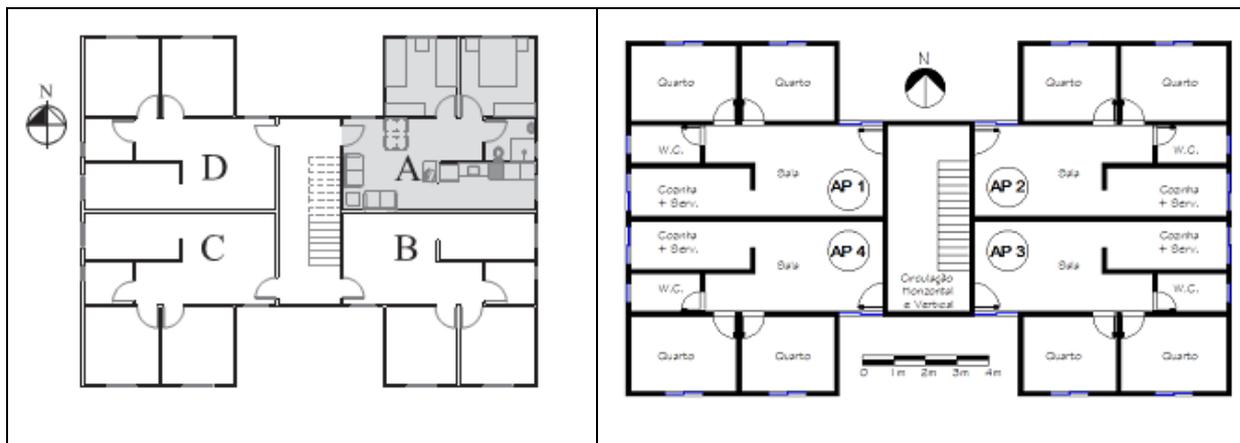
As tipologias analisadas pelos autores têm uma tendência a apresentar baixo desempenho térmico em relação aos edifícios residenciais multifamiliares que não fazem parte de programas sociais. Por esta razão, o estudo de ventilação natural nestas tipologias torna-se interessante, pois elas podem representar o pior cenário e ao mesmo tempo o público mais carente de edificações com um desempenho térmico que garanta o conforto dos usuários sem a necessidade de recorrer a equipamentos.

Sendo assim, as tipologias apresentadas pelos autores foram analisadas e a tipologia de apartamento típico para faixa de renda 1 em formato H foi escolhida por apresentar mais possibilidades de simulação das variáveis que afetam a ventilação natural nos edifícios. Além disto, esta tipologia de quatro apartamentos por andar é bastante praticada nas cidades brasileiras tanto em habitações populares quanto em edificações voltadas para a classe média, sofrendo algumas adaptações de acordo com o público alvo de cada empreendimento, como por exemplo, o acréscimo de um quarto e o aumento da área útil dos ambientes.

Conforme abordado no item 2.2.4, este modelo de habitação também foi analisado por Moraes (2013) quando avaliou o desempenho da ventilação natural em tipologias de habitação popular recorrentes na cidade de Campinas/SP (**Figura 32**).

³ A faixa de renda 1 corresponde a uma renda de até R\$1.600,00 e a faixa de renda 2 corresponde até R\$3.725,00. Para cada faixa de renda o Governo Brasileiro disponibiliza um tipo de subsídio diferente. Fonte: <http://www.brasil.gov.br>

Figura 32 – Planta baixa apresentada por Triana (2015), escolhida para o desenvolvimento desta tese à esquerda. À direita, planta baixa analisada por Morais (2013).

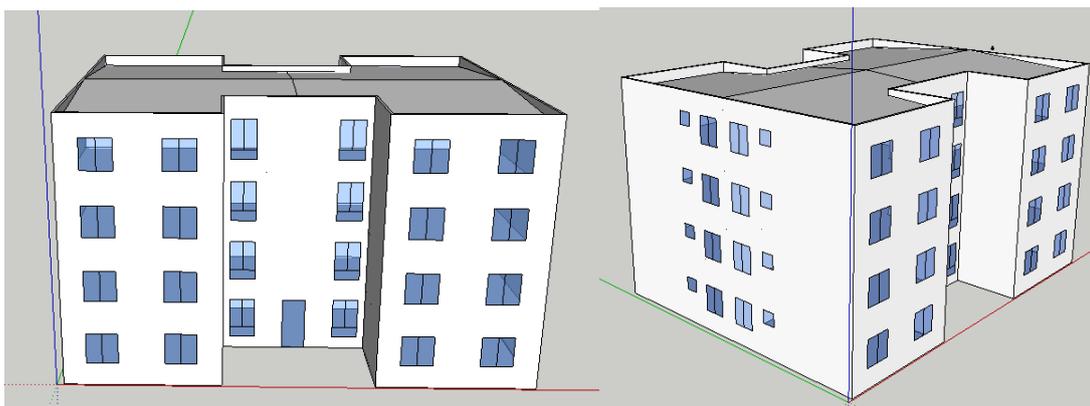


Fonte: Triana et al (2015), Morais (2013).

Segundo Triana (2015) a edificação típica escolhida para este estudo possui as seguintes características: área de serviço integrada com a cozinha, sala de estar/jantar integradas (além disto, não existem paredes ou portas que dividam a sala de estar/jantar e a cozinha/área de serviço, portanto, serão considerados como um único ambiente), paredes de painel de concreto de 10cm com transmitância de $4,4\text{W/m}^2\text{K}$ e capacidade térmica de $240\text{kJ/m}^2\text{K}$. Coberta em telha de fibrocimento e laje de concreto com 10cm de espessura, transmitância de $2,06\text{W/m}^2\text{K}$ e capacidade térmica de $233\text{kJ/m}^2\text{K}$. As janelas dos quartos são compostas por duas folhas de correr com área do vão de $1,44\text{m}^2$ e fator de ventilação⁴ de 0,45. A sala possui uma janela com duas folhas de correr e uma peça de vidro fixa na parte inferior da janela, totalizando vão de $1,60\text{m}^2$ e fator de ventilação de 0,375. A cozinha possui uma janela de $1,20\text{m}^2$ com duas folhas de correr e fator de ventilação de 0,45. E o banheiro uma janela de $0,36\text{m}^2$ tipo “boca de lobo” (**Figura 33**).

⁴ Fator ventilação = Fator que determina a área de abertura que permite a passagem do vento. Por exemplo, se o fator de ventilação é igual a 0,45 significa que 45% da área da janela permite a passagem do vento através dela para o interior do ambiente.

Figura 33 – Perspectivas do modelo escolhido para as análises.



Fonte: TRIANA et al, 2015.

Para facilitar a modelagem no PHOENICS, o modelo foi reconstruído no programa *SketchUp* a fim de captar as coordenadas x, y e z, referentes ao tamanho e posição de cada elemento através da ferramenta *Info Tools*, presente no *plugin OpenStudio* disponível para o *SketchUp*. Foi elaborada uma planilha com o nome de cada elemento (parede, piso, cobertura) e suas respectivas coordenadas, agilizando a modelagem no PHOENICS.

Os modelos foram construídos detalhando apenas os pavimentos que serão analisados: térreo e terceiro pavimento, transformando os outros pavimentos em blocos sem aberturas de modo a compatibilizar o tempo das simulações no PHOENICS com o tempo disponível para desenvolvimento do trabalho. Além dos pavimentos intermediários, o corredor também foi considerado um bloco fechado, já que a porta de acesso aos apartamentos geralmente fica fechada por questões de segurança. Da mesma forma, tanto as NBRs quanto o Regulamento de Eficiência Energética não consideram a porta principal como uma abertura de entrada de ar.

Após a confecção dos modelos no *SketchUp* e a captura das coordenadas em planilhas Excel, os modelos foram construídos no PHOENICS, elemento por elemento (piso, paredes e teto), deixando os espaços abertos nas aberturas.

3.2 Análise paramétrica de ventilação natural

Para definição dos parâmetros que serão investigados nesta tese, inicialmente foram identificadas as principais variáveis que afetam o desempenho da ventilação natural nas edificações. Estas variáveis foram divididas conforme a sua origem nas seguintes categorias: condições microclimáticas, entorno, características da edificação, configuração das aberturas e comportamento do usuário, como mostra o **Quadro 3**.

A partir deste quadro, foi realizado o recorte deste trabalho que tem como foco a análise da influência da **configuração das aberturas** no desempenho da ventilação natural. Dentre os aspectos relacionados à abertura listados, foram escolhidos para análise: a área efetiva de aberturas externas, a relação entre área de abertura de entrada e área de abertura de saída na unidade habitacional e a porosidade das portas internas (ventilação cruzada). Estas variáveis foram escolhidas pelos motivos explicitados a seguir e estão destacadas em cor rosa no Quadro 3:

1. Esses parâmetros têm influência direta e significativa no desempenho da ventilação natural nas edificações;
2. Geralmente, são características definidas por arquitetos durante o processo projetual. Sendo assim, se o arquiteto tiver informações precisas sobre como configurar melhor as aberturas, de forma a obter um melhor desempenho da ventilação natural, pode assim fazê-lo.
3. O dimensionamento das aberturas está presente nas recomendações das principais normas de desempenho de edificações e regulamentos, sendo a única variável presente nas Normas Brasileiras (ABNT, 2005, 2013) como forma de recomendação quantitativa para ventilação natural (dada pela relação entre área de abertura x área do piso do ambiente), conforme visto em seções anteriores. A relação entre área de aberturas de entrada e saída está presente no Regulamento de Eficiência Energética (BRASIL, 2012) na forma de pré-requisito para avaliação do potencial para ventilação cruzada na envoltória de edificações residenciais. Como este trabalho visa contribuir para estas Normas e Regulamentos, foram escolhidos esses parâmetros para análise.

Quadro 3 – Resumo das principais variáveis que influenciam o desempenho da ventilação natural nas edificações, com destaque para os aspectos escolhidos para análise.

RESUMO DAS PRINCIPAIS VARIÁVEIS QUE INFLUENCIAM O DESEMPENHO DA VENTILAÇÃO NATURAL EM EDIFICAÇÕES		
Condições microclimáticas	relevo/topografia	
	proximidade a massas d'água	
	direção predominante do vento	
	velocidade do vento	
	frequência e período de calmarias	
	dados de vento e chuva	
Entorno	obstruções/ porosidade	
	densidade construtiva	em relação ao Coeficiente de Aproveitamento em relação à Taxa de Ocupação
	rugosidade do terreno	
	influência de vegetação	
Características da edificação	partições internas	
	layout interno dos ambientes	
	existência de dutos/poços	verticais horizontais
	dispositivos de captação ou exaustão	peitoril ventilado, bandeiras, sheds...
	forma do edifício	
	altura do edifício	
	porosidade do edifício	
Configuração das aberturas	localização	
	dimensionamento	
	tipologia da esquadria	em relação ao material de vedação
		em relação à forma de abrir
		existência de elementos próximos às aberturas
	formato da esquadria	
	ventilação cruzada	no ambiente
		na unidade habitacional
Comportamento do usuário	padrões de uso da janela	
	padrões de uso do edifício	

Fonte: Elaborado pela autora.

Desta forma, foram definidos os objetivos das análises conforme os parâmetros escolhidos, dividindo-os em dois grupos como pode ser visualizado no **Quadro 4**.

Quadro 4 – Grupos de análise definidos para a pesquisa, mostrando as variáveis a serem consideradas em cada grupo.

Grupo de Análise 1	ÁREA DE ABERTURA
	influência de diferentes áreas de abertura presentes nas Normas Brasileiras no desempenho da ventilação natural em um modelo de edifício
Grupo de Análise 2	VENTILAÇÃO CRUZADA
	influência da porosidade das portas internas no desempenho da ventilação cruzada em ambientes com apenas uma abertura de entrada
	influência de diferentes proporções de área de abertura de saída/área de abertura de entrada na unidade habitacional

Fonte: Elaborado pela autora.

A seguir, serão apresentados os parâmetros adotados nas simulações quanto à área de abertura, e ventilação cruzada (relação entre área de abertura de entrada e área de abertura de saída e porosidade das portas internas), além de ângulo de incidência e velocidades do vento.

3.2.1 Área de abertura

No primeiro grupo de análise, serão simulados os seguintes percentuais de área de abertura com relação à área do piso: 8%, 12%, 25% e 40%. Esses percentuais foram escolhidos por estarem presentes nas Normas 15.220 e 15.575 como recomendações para as diversas regiões do Brasil, conforme visto anteriormente (**Quadro 2**).

Sendo assim as áreas de piso dos ambientes foram calculadas para determinar a área de abertura em relação às áreas de piso, como presente nas normas, e foi calculada também qual seria o equivalente percentual em relação à área da fachada de cada ambiente. Isto porque, muitas vezes, quando se tem ambientes onde a área de parede localizada na fachada externa é estreita, não é possível adotar grandes percentuais de abertura em relação à área do piso, pois a área de fachada disponível é menor do que a área de abertura necessária.

No caso do modelo adotado, os percentuais de 25% e 40% de abertura em relação à área de piso não puderam ser alcançados no ambiente Sala+Cozinha. Sendo o máximo de abertura em relação a área de piso neste ambiente de 18% em função das fachadas estreitas dos ambientes. Já no banheiro, o máximo percentual alcançado foi de 32%. Estes valores estão destacados em vermelho no quadro a seguir (**Quadro 5**).

Quadro 5 – Dimensionamento das aberturas em cada um dos quatro casos considerados.

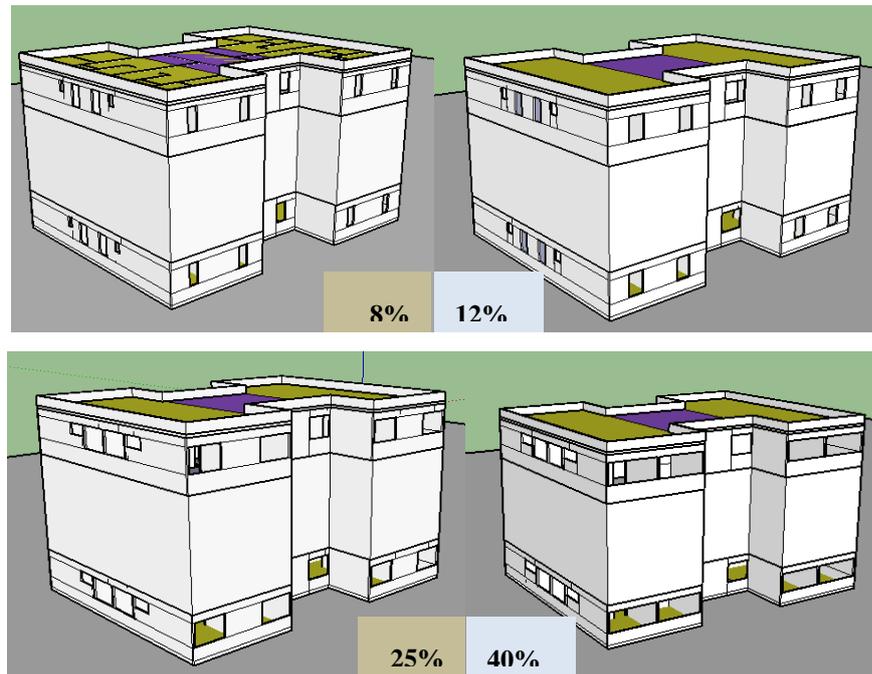
CASO 1: Área de abertura = a 8% da Área do Piso (NBR 15.575)					
AMBIENTE	AEV	AP	AF	AEV/AP	AEV/AF
Quarto 1 (m ²)	0,66	8,28	6,90	8%	10%
Quarto 2 (m ²)	0,72	8,70	7,25	8%	10%
Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	0,90	22,54	8,38	8%	21%
	0,90				
Banheiro (m ²)	0,25	3,13	4,15	8%	6%
CASO 2: Área de abertura = a 12% da Área do Piso (NBR 15.575)					
Quarto 1 (m ²)	0,99	8,28	6,90	12%	14%
Quarto 2 (m ²)	1,04	8,70	7,25	12%	14%
Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	1,86	22,54	8,38	12%	10%
	0,84				
Banheiro (m ²)	0,36	3,13	4,15	12%	9%
CASO 3: Área de abertura = a 25% da Área do Piso (NBR 15.575)					
Quarto 1 (m ²)	2,07	8,28	6,90	25%	30%
Quarto 2 (m ²)	2,18	8,70	7,25	25%	30%
Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	1,86	22,54	8,38	18%	26%
	2,16				
Banheiro (m ²)	0,78	3,13	4,15	25%	19%
CASO 4: Área de abertura máxima limitada pela fachada (próximo aos 40% da área do piso - NBR 15.220)					
Quarto 1 (m ²)	3,31	8,28	6,90	40%	48%
Quarto 2 (m ²)	3,48	8,70	7,25	40%	48%
Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	1,86	22,54	8,38	18%	26%
	2,16				
Banheiro (m ²)	0,99	3,13	4,15	32%	24%

Onde: **AEV** – Área de abertura efetiva para ventilação, **AP** – Área de Piso e **AF** – Área de fachada de cada ambiente.

Fonte: Elaborado pela autora.

A partir do modelo original, foram configuradas as aberturas com área de 8%, 12%, 25% e 40% em relação às áreas de piso dos ambientes, gerando quatro modelos diferentes no *SketchUp* (Figura 34). Inicialmente, os modelos foram construídos com as portas internas consideradas abertas.

Figura 34- Modelos construídos no *SketchUp* com 8, 12, 25 e 40% de área de abertura.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.2.2 Relação entre área de aberturas de entrada e área de aberturas de saída na unidade habitacional

Neste tópico, será verificada a influência de diferentes proporções da relação entre área de abertura de entrada/área de abertura de saída, na unidade habitacional, capaz de favorecer a ventilação cruzada.

Dentre as recomendações normativas em vigor, a única diretriz relacionada à Ventilação Cruzada na unidade habitacional que existe no país atualmente, é aquela presente no Regulamento Técnico da Qualidade do Nível de Eficiência Energética – RTQ-R. Segundo o regulamento, a unidade habitacional deve atender a proporção de 25% entre aberturas dispostas em fachadas distintas sejam adjacentes ou opostas, independente da direção predominante dos ventos na região.

As relações entre área de abertura de entrada/área de abertura de saída de cada modelo foram calculadas em função das áreas de abertura dimensionadas (**Quadro 5**). O cálculo foi feito de acordo com as instruções do RTQ-R (BRASIL, 2012), que diz:

Nas Zonas Bioclimáticas 2 a 8, a UH deve possuir ventilação cruzada proporcionada por sistema de aberturas compreendido pelas aberturas externas e internas. Portas de acesso principal e de serviço não serão consideradas como aberturas para ventilação.

O projeto de ventilação natural deve promover condições de escoamento de ar entre as aberturas localizadas em pelo menos duas diferentes fachadas (opostas ou adjacentes) e orientações da edificação, permitindo o fluxo de ar necessário para atender condições de conforto e higiene. As aberturas devem atender à proporção indicada na Equação: $A2/A1 \geq 0,25$, onde: A1: somatório das áreas efetivas de aberturas para ventilação localizadas nas fachadas da orientação com maior área de abertura para ventilação (m²); A2: somatório das áreas efetivas de aberturas para ventilação localizadas nas fachadas das demais orientações (m²).

Sendo assim, o caso 1, com 8% de área de aberturas em relação à área do piso possui relação entre áreas de abertura de saída e entrada do vento de 50%. O caso 2, com 12% de área de abertura em relação à área do piso apresenta 31%, o caso 3 com 25% de área de abertura em relação a área de piso possui 48% e o caso 4, com 40% da área de abertura em relação às áreas de piso, teve como resultado o percentual de 36% de relação entre áreas de abertura de saída e entrada e do vento (**Quadro 6**).

Quadro 6 – Proporção entre aberturas de saída e entrada do vento em cada caso analisado.

CASOS	ÁREA DE ABERTURA/ ÁREA DO PISO (%)	ÁREA DE SAÍDA/ÁREA DE ENTRADA (%)
1	8	50
2	12	31
3	25	48
4	40	36

Fonte: Elaborado pela autora.

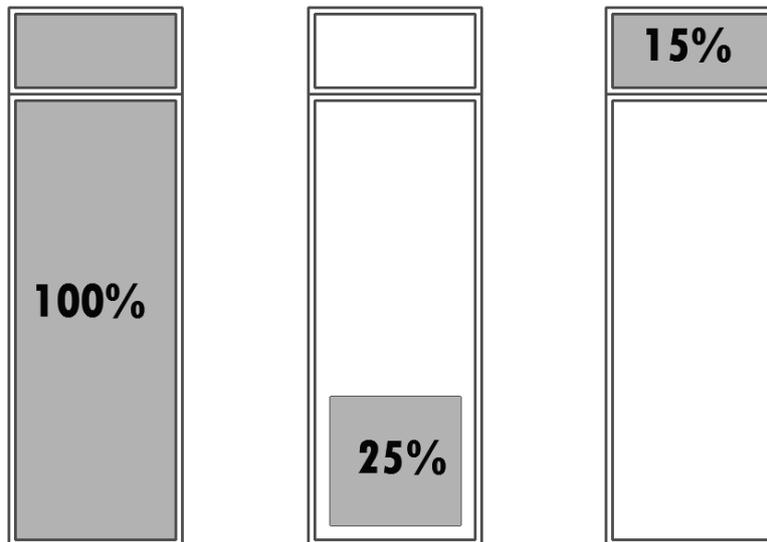
3.2.3 Porosidade das portas internas

Além da relação entre áreas de aberturas de entrada e saída, a ventilação cruzada depende também da existência de aberturas entre os ambientes, garantindo o escoamento do ar em toda unidade habitacional.

Portanto, para analisar a ventilação cruzada no modelo, serão simulados três tipos de porosidade das portas internas dos ambientes quarto 1, quarto 2 e banheiro (a cozinha não possui porta no projeto original e foi mantida aberta em todas as simulações). As porosidades das portas internas consideradas foram: 100% de porosidade, considerando uma situação de porta aberta com bandeira aberta, 25% de porosidade considerando uma situação de

venezianas na parte inferior da porta, e 15% de porosidade considerando uma bandeira aberta (**Figura 35**).

Figura 35 – Diferentes porosidades da porta de acesso aos ambientes, onde a parte hachurada em cinza corresponde à área considerada vazada nas simulações.



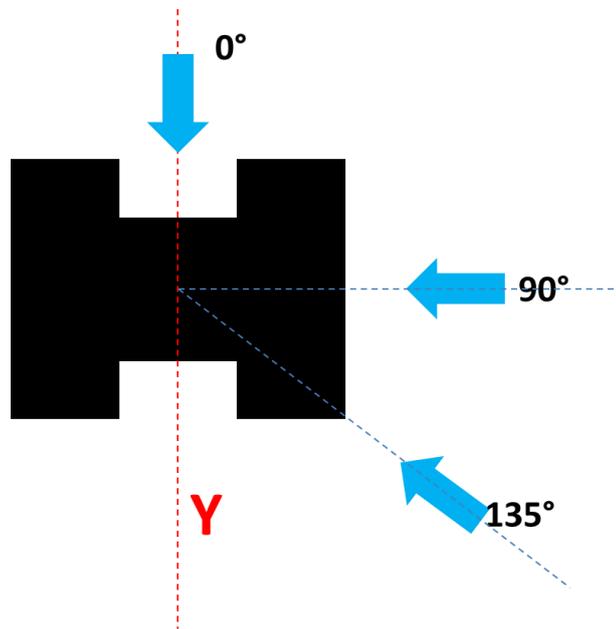
Fonte: Elaborada pela autora.

3.2.4 Ângulo de incidência e velocidade dos ventos

Quanto à incidência dos ventos, como os apartamentos são iguais, apenas rebatidos em planta, foram analisados três ângulos de incidências do vento em relação ao edifício, a fim de verificar a influência da orientação das aberturas em relação aos ventos predominantes em qualquer região onde ele esteja implantado, no desempenho da ventilação natural.

As incidências analisadas foram: incidência 1 igual a 0° , a incidência 2 igual a 90° , a incidência 3 igual a 135° em relação ao eixo Y no domínio do programa (localização do Norte), cobrindo assim, todos os ângulos de incidência de 45° em 45° graus para o modelo analisado, considerando que os apartamentos possuem planta espelhada (**Figura 36**).

Figura 36– Incidências de vento em relação ao eixo Y, consideradas nas simulações.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para a escolha das velocidades médias do vento a serem simuladas, foram observadas as velocidades médias mensais do vento nas capitais brasileiras, considerando que estas se localizam em realidades climáticas distintas. Foram calculadas as velocidades médias anuais, **Quadro 7**, e observou-se que a média da velocidade entre as cidades é de 2m/s, sendo este também o valor mais frequente. A mediana foi calculada e obteve-se como resultado o valor de 1,93m/s. Por este motivo, as simulações iniciais foram realizadas utilizando a velocidade de entrada de 2m/s.

Quadro 7 - Velocidades médias anuais do vento nas capitais brasileiras.

Capital		Velocidade média anual
1	Aracaju - SE	3,37
2	Belém - PA	1,00
3	Belo Horizonte - MG	2,25
4	Boa vista - RR	1,53
5	Brasília - DF	2,45
6	Campo Grande - MS	3,45
7	Cuiabá - MT	1,93
8	Curitiba - PR	2,18
9	Florianópolis - SC	2,43
10	Fortaleza - CE	2,25
11	Goiânia - GO	1,41
12	João Pessoa - PB	2,42
13	Macapá - AP	1,27
14	Maceió - AL	2,73
15	Manaus - AM	1,40
16	Natal - RN	4,23
17	Palmas - TO	1,64
18	Porto Alegre - RS	1,56
19	Porto Velho - RO	1,39
20	Recife - PE	1,83
21	Rio Branco - AC	1,43
22	Rio de Janeiro - RJ	1,35
23	Salvador - BA	1,28
24	São Luiz - MA	2,08
25	São Paulo - SP	2,08
26	Teresina - PI	1,32
27	Vitória - ES	2,04

Fonte: Adaptado de LabEEE, 2015.

Posteriormente, foram escolhidos dois casos dentre os 24 modelos simulados, para realizar uma nova simulação, aumentando-se a velocidade do ar de entrada no programa para 3 m/s. Esta velocidade foi escolhida por ser a segunda mais frequente, dentre as velocidades das capitais brasileiras analisadas (**Tabela 3**). Estes dois últimos casos foram acrescentados à matriz inicial a fim de verificar o efeito do incremento da velocidade do ar em dois modelos: com 8% de área de abertura em relação à área do piso a incidência de 0° e com 40% de área de abertura em relação à área do piso a incidência de 135°, representando os dois extremos considerados neste trabalho (pior e melhor caso respectivamente). Ambos os modelos foram simulados com 100% de porosidade das portas internas.

Tabela 3 – Frequência de ocorrência das velocidades médias do ar nas 27 capitais brasileiras.

Velocidade do ar (m/s)	Frequência de ocorrência
1	1
2	13
3	10
4	2
5	1
total	
27	27

Fonte: Elaborado pela autora.

Levando em consideração as variáveis supracitadas, bem como, o tamanho do modelo escolhido e o tempo de processamento de cada modelo, foi elaborada a matriz de simulações. Somando-se todos os casos analisados, o número total de modelos é 26 e devido a sua extensão, esta matriz está apresentada no Apêndice A.

3.3 Simulações computacionais através do software PHOENICS: configurações

O PHOENICS é um software desenvolvido pela empresa britânica CHAM, e foi o primeiro código computacional baseado na dinâmica dos fluidos computadorizada (CFD) a surgir no mercado. O programa se utiliza do cálculo através de elementos finitos para resolver as equações diferenciais da dinâmica dos fluidos e desde o seu lançamento em 1981, vem sendo utilizado por arquitetos, construtores, engenheiros, indústrias e em pesquisas acadêmicas (CHAM, 2005).

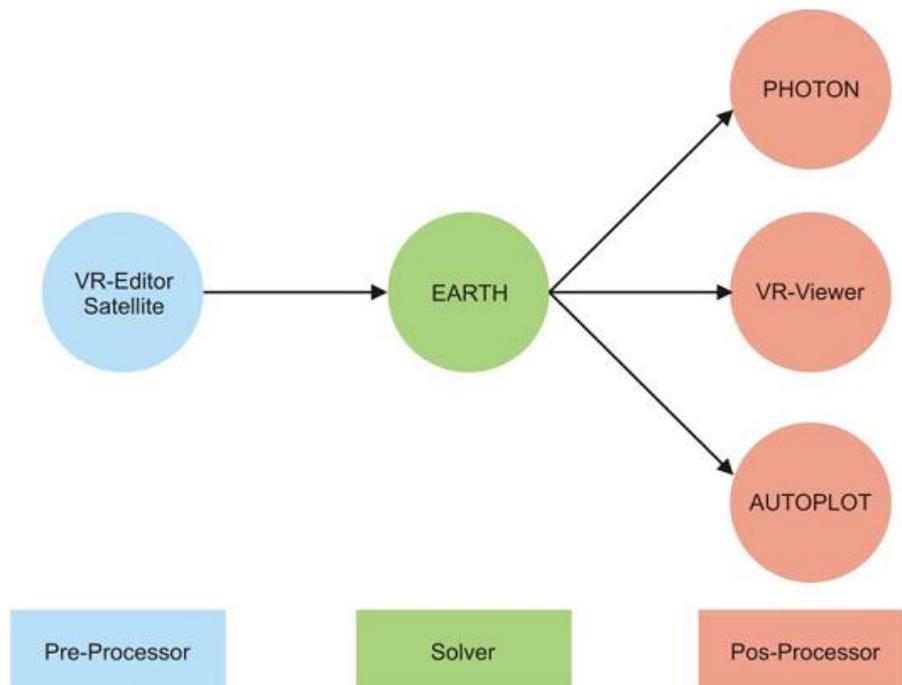
Segundo Oliveira (2009) o método dos volumes finitos é o mais utilizado na resolução de problemas de escoamento, tendo sido utilizado na literatura especializada com sucesso em um grande número de problemas.

O nome PHOENICS é um acrônimo para Parabolic Hyperbolic Or Elliptic Numerical Integration Code Series (CHAM, 2005). O software é bastante flexível, permitindo simular diversas situações incluindo “(...) escoamento multifásico, transferência de calor, processos com reações químicas, acompanhamento de partículas, dispersão de fumaça, aerodinâmica, análise de eficiência de equipamentos, climatização e ventilação, entre outros” (SAFE SOLUTIONS, 2012).

Assim como a maioria dos programas computacionais para simulação de CFD, inclui basicamente, três etapas de simulação (**Figura 37**). A primeira etapa é conhecida como *pre-*

processor e consiste na construção e configuração do modelo a ser simulado. É nesta etapa que são inseridos dados climáticos como velocidade e direção do vento, as condições de contorno do domínio, bem como as características da edificação a ser simulada. A segunda etapa (*solver*) é onde ocorre a simulação propriamente dita. Durante a simulação o programa exibe gráficos de monitoramento de erros e tempo de execução. Na terceira e última etapa (*pos-processor*) tem-se a visualização dos resultados, que podem ser gráficos de campos de velocidade ou pressão, ou gráficos de vetores. Neste módulo é possível também montar animações e extrair imagens (LAMENHA, 2015).

Figura 37 – Etapas de simulação no programa CFD PHOENICS.



Fonte: SACRAMENTO, 2012.

3.3.1 Correção da velocidade do ar: consideração do entorno

Conforme citado no item 3.1.4, a velocidade a ser considerada nas simulações será de 2m/s, por ser uma velocidade considerada predominante nas cidades brasileiras. Entretanto é necessário que se faça uma correção deste valor para a altura da abertura que se deseja estudar, já que esses dados geralmente são coletados em estações meteorológicas, localizadas em áreas abertas, cujos anemômetros são posicionados a uma altura padrão de 10 metros. A não observação dessa correção é provavelmente uma das fontes de erro mais comuns no cálculo das taxas de renovação de ar (BITTENCOURT; CANDIDO, 2008).

Existem diversos modelos de correção para ajustar a velocidade do vento à altura da abertura, com base nas características de rugosidade e adensamento do entorno, variando de campos abertos a regiões centrais em grandes cidades. Para esta tese optou-se por simular a condição de rugosidade menos favorável à ventilação natural (centro de cidade). Neste caso, utilizando os valores: $k=0,21$ e $a=0,33$, dentre os valores demonstrados no **Quadro 8**.

Quadro 8– Coeficientes de rugosidade de terreno adotados nas simulações.

COEFICIENTES DE RUGOSIDADE DO TERRENO		
Terreno	k	a
Área aberta plana	0,68	0,17
Campo com obstáculos esparsos	0,52	0,20
Área suburbana	0,35	0,25
Centro de cidade	0,21	0,33

Fonte: BITTENCOURT; CANDIDO, 2008 apud JACKMAN.

Estes coeficientes foram utilizados no cálculo da altura de referência (reference height=113,21m), através da equação (BRE,1978):

$$V_z = V_{10} \times K \times Z^a, \text{ onde:}$$

V_z é a velocidade do vento na altura Z de interesse (m/s);

V_{10} é a velocidade do vento a 10 metros de altura (m/s);

Z é a altura da cumeeira para edificações de até dois andares ou a altura da janela para edificações mais altas (m);

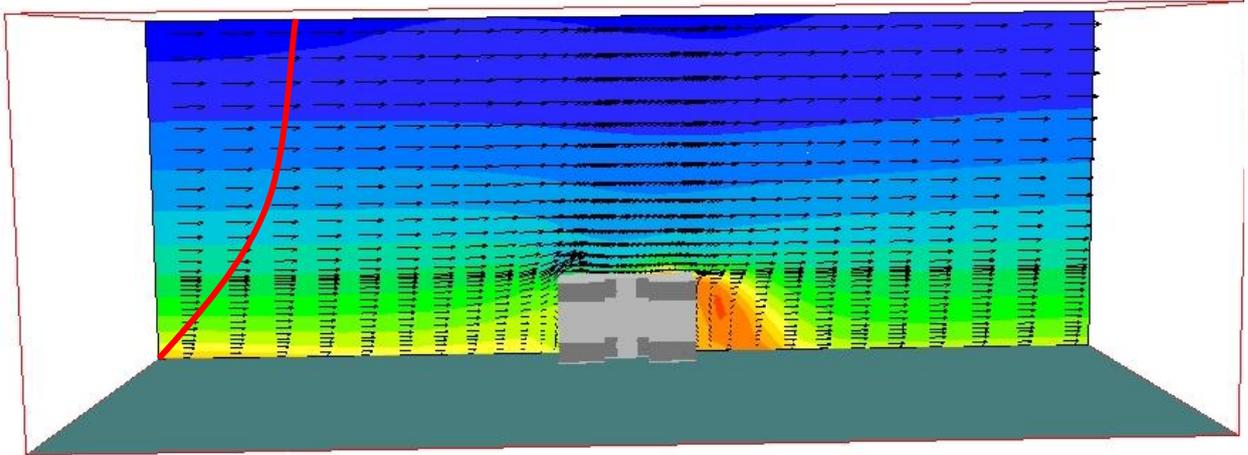
K e a são função da localização da edificação e podem ser obtidos por tabelas (**Quadro 8**).

Além disto, o valor do coeficiente $a = 0,33$ também foi usado no campo Power Law index do software, determinando assim a configuração do gradiente de vento no programa.

3.3.2 Configuração do gradiente de vento

Foi utilizado o objeto WIND disponível nesta versão do Programa. Wind é criado como um objeto cujos atributos podem ser configurados, tais como velocidade a uma altura de referência e a direção (**Figura 38**). Neste caso, não é preciso definir áreas de entrada e saída de ar no domínio (*inlet* e *outlet*), nem calcular o gradiente de vento para cada altura, o próprio programa já realiza os cálculos a partir das configurações do WIND.

Figura 38 – Gradiente de vento determinado no programa por meio da configuração do objeto WIND, com destaque para o gradiente de vento.



Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.3 Cálculo do domínio

Domínio em um ambiente CFD, é o espaço no qual o modelo será inserido e simulado. Deve ter um tamanho que permita o livre escoamento do fluxo de modo a não ocasionar interferências nos campos de pressão gerados nas simulações (SACRAMENTO, 2012). Para esta investigação, as dimensões do domínio foram calculadas segundo as orientações do suporte técnico do software para utilização do módulo WIND.

Foram utilizadas as seguintes equações na definição dos limites do domínio:

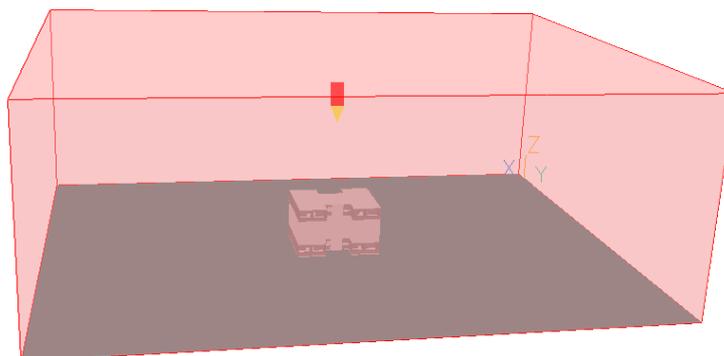
$$\mathbf{X}_{dom} = 3 \cdot X_{obj} + X_{obj} + 3 \cdot X_{obj}$$

$$\mathbf{Y}_{dom} = 3 \cdot Y_{obj} + Y_{obj} + 3 \cdot Y_{obj}$$

$$\mathbf{Z}_{dom} = 3 \cdot Z_{obj} + Z_{obj}$$

Sendo assim, as dimensões do objeto (edifício) foram calculadas no *Sketch Up* obtendo-se os seguintes valores: $x=17,62\text{m}$, $y=13,6\text{m}$ e $z=11,15\text{m}$. Aplicando-se os valores nas fórmulas, obtiveram-se os seguintes resultados: **$X_{dom}= 123,34\text{m}$** , **$Y_{dom}=95,20\text{m}$** , **$Z_{dom}=44,60\text{m}$** .

Figura 39 – Domínio calculado, representado pelo WIND, com o modelo ao centro.



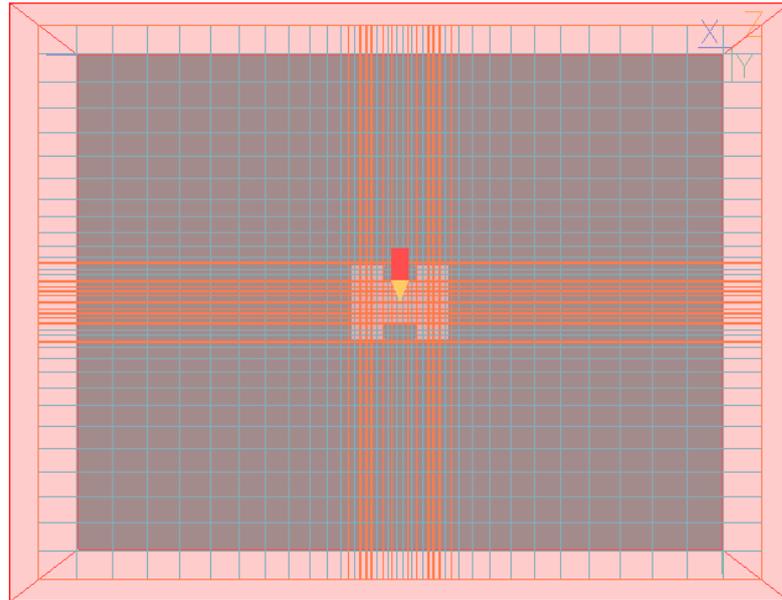
Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.4 Configuração da malha

A malha é a subdivisão do domínio em um conjunto de volumes elementares nos quais o modelo numérico resolverá as equações básicas. A divisão do espaço é realizada através de um algoritmo computacional específico em cada software. É importante verificar se a malha resultante deste processo possui volumes elementares homogêneos, pois o resultado final da simulação depende da qualidade da malha (CUMPLIDO NETO et al, 2011). No caso do PHOENICS, a malha ou *grid* pode ser configurada de três formas: cartesiana, cilíndrico-polar ou body-fited (BFC). Como o modelo em análise possui forma ortogonal, adotou-se a malha cartesiana para este trabalho.

Inicialmente, uma malha preliminar é definida pelo próprio software com base na geometria do objeto. A partir desta malha criada pelo programa é necessário refinar os pontos onde se deseja conhecer detalhadamente o fluxo do vento, para que nestes pontos os resultados sejam mais precisos. Sendo assim, nessa primeira fase, iniciou-se um processo de testes, onde as malhas configuradas eram simuladas para verificar o tempo da simulação, a precisão dos resultados e a viabilidade da malha. Após vários testes, a malha resultante é exibida nas imagens a seguir (**Figura 40; Figura 41**).

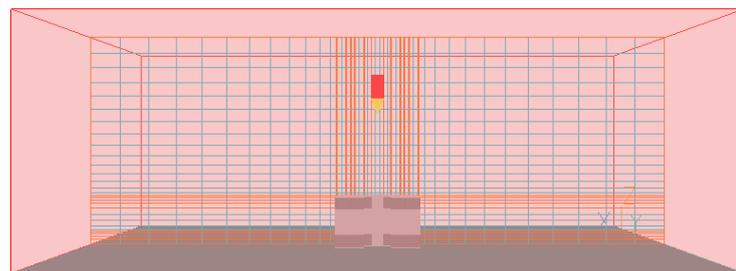
Figura 40 – Malha configurada no software PHOENICS para o modelo em planta baixa.



Fonte: Elaborado pela autora.

É importante destacar que a malha foi configurada de modo a se obter resultados mais precisos dentro do edifício onde foram realizadas as análises desta tese. Além disto, o fabricante recomenda evitar a proximidade de células de tamanhos diferentes a fim de minimizar a possibilidade de erros de simulação. Isto foi feito utilizando a ferramenta *Power Law* que possibilita uma gradação automática no tamanho das células.

Figura 41 - Malha configurada no software PHOENICS para o modelo em vista, com espaçamento exponencial das células.



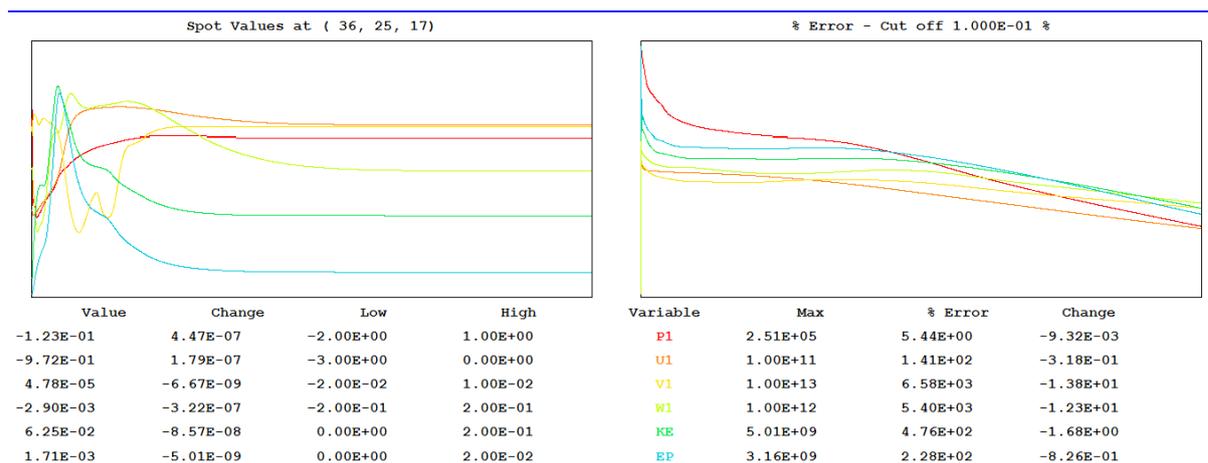
Fonte: Elaborado pela autora.

3.3.5 Parâmetros de relaxamento e critérios de convergência

A relaxação é uma técnica que o programa utiliza para diminuir as possíveis taxas excessivas de oscilação dos resultados. Isso não afeta a solução final. Em muitos casos, a convergência será muito difícil de obter sem configurações de relaxamento adequadas, por isto é muito importante que elas sejam configuradas corretamente. Foram utilizados os seguintes parâmetros de relaxamento: $P1=0.1$; $U1=V1=W1=0.0155$; $KE=0.1$; $EP=0.1$, onde P = pressão, U = velocidade em X , V = velocidade em Y , W = velocidade em Z , KE = energia cinética turbulenta, EP = dissipação da energia cinética, seguindo instruções do suporte técnico para as condições de simulação deste trabalho.

O algoritmo computacional do software resolve as equações governantes a partir do método dos elementos finitos. Como critério de convergência dos resultados, foi inserido um erro médio de 10^{-4} . O modelo de turbulência utilizado foi o $k-\epsilon$, que é mais comumente utilizado neste tipo de simulação. A Figura 42 a seguir, mostra a curva de erros da simulação do modelo com 25% de área de abertura em relação à área de piso e vento a 90° . É possível observar que o erro converge de forma estável (sem grandes oscilações) para o valor adotado pelo critério de erro e os valores das variáveis calculadas no *Spot Values* ficam constantes no decorrer dos cálculos.

Figura 42 – Gráfico de erros e *spot values* da simulação de modelo com 25% de área de abertura em relação à área de piso e incidência de vento 90° .



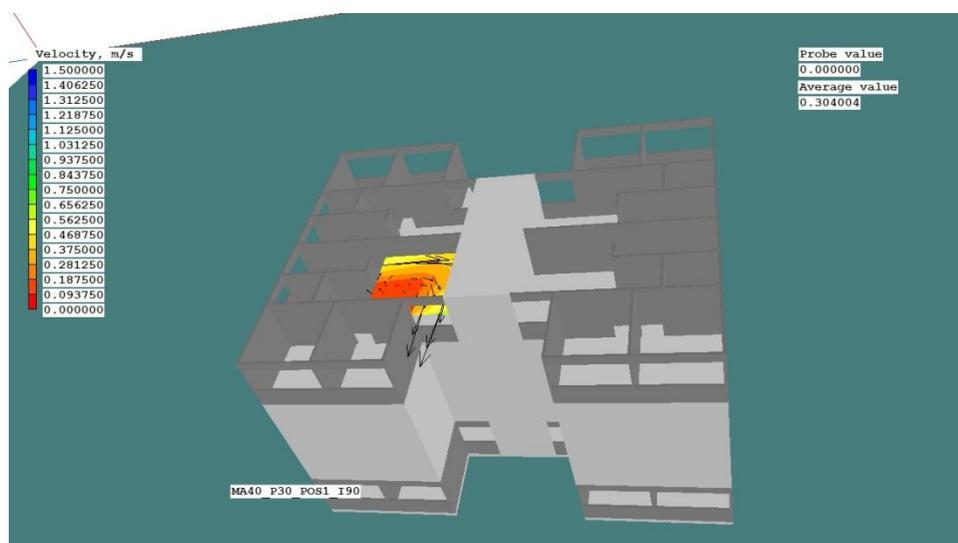
Fonte: Elaborado pela autora.

3.4 Análise dos resultados das simulações

Para análise quantitativa, foram extraídas as médias da velocidade do ar em cada ambiente de cada apartamento nos dois pavimentos investigados. Isto foi feito utilizando a

ferramenta *Plot Limits* do PHOENICS que permite a configuração de um plano a qualquer altura, inserindo as coordenadas x, y e z de início e de final deste plano (**Figura 43**). A partir da configuração destes planos o usuário pode obter dados quantitativos (velocidade do ar, pressão) tendo como base os cálculos realizados na malha durante as simulações. Este procedimento foi feito em cada ambiente da planta, repetindo as coordenadas a cada modelo, e os dados foram registrados em uma planilha Excel para posterior análise, elaborando-se tabelas e gráficos.

Figura 43 – Plano definido para sala do apartamento C a 1,5m de altura do piso.

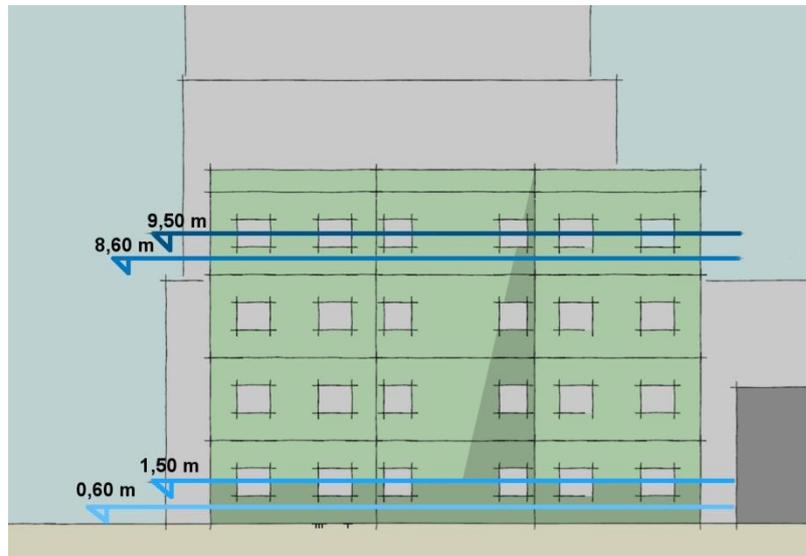


Fonte: Elaborado pela autora.

De acordo com Reed (1953), o fluxo de ar deve atingir a zona de atividade do ambiente, sendo a melhor localização para as aberturas de entrada do ar de 0,5m a 1,5m acima do piso. Sendo assim, foram coletadas as velocidades do ar em duas alturas: 0,6m acima do piso dos pavimentos, que seria a altura de um usuário sentado ou deitado e 1,5m acima do piso dos pavimentos que seria a zona mediana de respiração do ser humano (MORAIS, 2013).

Destaca-se que nos modelos configurados com porosidade das portas internas igual a 25%, a abertura foi localizada na parte inferior das portas e por isso a verificação das velocidades internas a 0,6m do chão foi utilizada também para verificar se houve algum incremento na velocidade do ar nestes modelos.

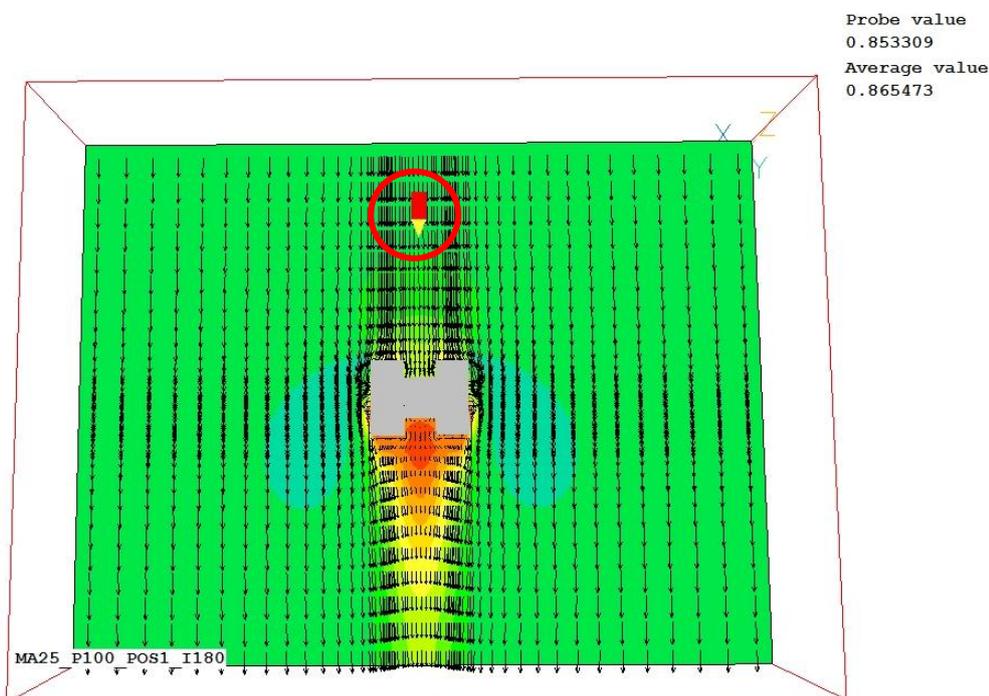
Figura 44 – Alturas em relação ao solo, onde foram analisadas as velocidades do ar internas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Além dos valores médios de velocidade do ar nos ambientes, foram calculados os coeficientes de velocidade para cada caso comparando os valores de velocidade do ar média interna em relação aos valores de velocidade externa na mesma altura antes do vento ser perturbado pela edificação (GIVONI, 1962). Os valores externos também foram extraídos das simulações realizadas com o software PHOENICS, medidos a barlavento antes do fluxo de ar sofrer perturbações. Este mesmo procedimento foi adotado por Moraes (2013) para análise de habitações de interesse social em Campinas/SP.

Figura 45 – Localização do *probe* onde se registrou o valor de referência da velocidade do ar externa.



Fonte: Elaborada pela autora.

Na **Figura 45**, apresenta-se o modelo com 25% de área de abertura em relação à área de piso, com incidência de vento a 0° , visto de cima. O *probe* está localizado a barlavento, antes do fluxo de ar sofrer perturbações devido ao encontro com o edifício. O valor de velocidade do ar neste ponto é demonstrado no canto superior direito da tela em *probe value*, e neste caso é igual a 0,85m/s. É importante esclarecer que esta localização do *probe* foi utilizada apenas para o cálculo dos coeficientes de ventilação (CVs).

Outra análise essencial para verificar o desempenho da ventilação natural, é a análise qualitativa do fluxo de ar, observando se ele atinge os usuários dos espaços. Portanto, foram extraídas imagens que possibilitaram a análise qualitativa do fluxo de ar no interior do edifício, em cada modelo simulado. As imagens foram extraídas a altura de 0,6m e 1,5m do piso no térreo e 3º pavimento, assim como a obtenção dos valores de velocidade média.

É importante destacar que a escala de velocidade utilizada foi de 0,0 a 1,5m/s, pois foi essa faixa de velocidade mais frequentemente encontrada em todos os modelos simulados. Apenas em um dos modelos, com 40% de área de abertura em relação à área do piso, 100% de porosidade das portas e vento incidente a 135° que esses valores foram ultrapassados em alguns ambientes. Mas para efeito de comparação a escala de valores foi mantida.

Outro detalhe na visualização dos resultados, é que as cores tradicionais do programa foram invertidas para ter uma melhor relação com os resultados de velocidade do ar sendo os valores mais baixos com cores mais quentes e os valores mais altos de velocidade do ar representados com cores mais frias nas imagens.

3.5 Aceitabilidade do movimento do ar

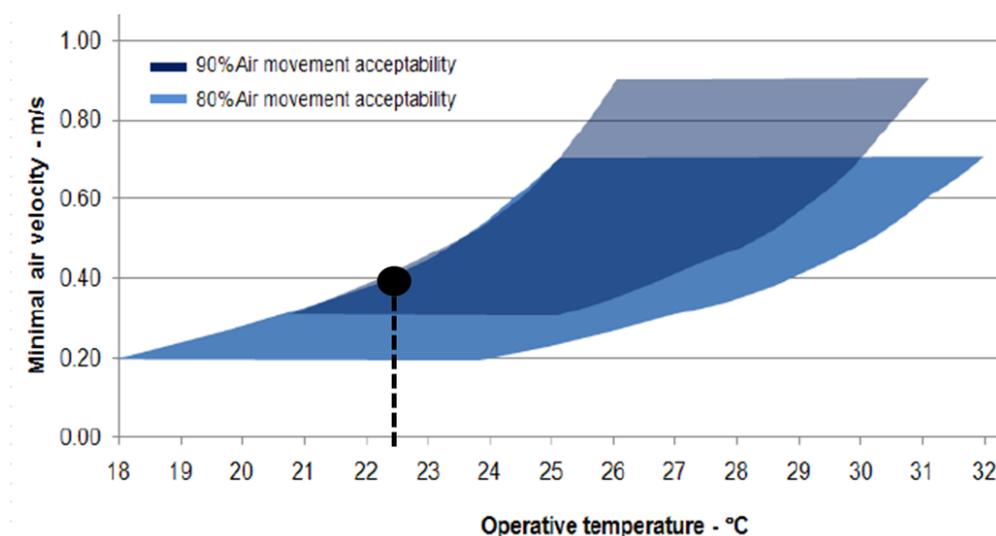
Conforme observado no item 2.1.1, o movimento do ar pode reduzir a temperatura efetiva através da evaporação do suor da pele e das trocas convectivas entre o fluxo de ar e o corpo humano, auxiliando na sensação de conforto térmico (BITTENCOURT, 1993). Os limites de temperaturas do ar aceitos como confortáveis podem ser estendidos em função da velocidade do ar (BRE 1979 apud BITTENCOURT, 1993).

Sabe-se também que a velocidade do ar é um dos principais aspectos que afetam a sensação de conforto térmico. Entretanto não é o único, já que o conforto depende também das variáveis humanas como vestimenta e metabolismo e de outras variáveis climáticas como a temperatura e umidade do ar. Por esta razão, estudos têm sido desenvolvidos no intuito de identificar as faixas de velocidade do ar em que os usuários se dizem mais confortáveis (TANABE, 1988, TOFTUM, ZHOU, MELIKOV, 1997, NICOL, 2004).

Neste sentido, estudos recentes mostram que grande parte dos usuários prefere mais movimento do ar, especialmente em condições em que o ambiente térmico é percebido como quente, neutro ou levemente frio. Em temperaturas acima de 22,5°C o risco de desconforto por rajadas de vento é muito baixo e a preferência por maiores velocidades do ar é maior (ARENS et al, 2009). Outros estudos mostram ainda que cidadãos de climas quentes tendem a preferir maiores velocidades do ar, descartando a possibilidade de desconforto nesses casos (TOFTUM, 2004).

Confirmando esta tendência, Candido *et al* (2010) analisaram as preferências dos usuários em relação ao movimento do ar em edificações em cidade de clima quente e úmido, e verificaram uma significativa tolerância a valores de velocidade mais altos, chegando a constatar 90% de satisfação com valores acima de 0,8m/s (**Figura 46**).

Figura 46 – Valores mínimos para velocidade do ar com 80 e 90% de aceitabilidade.



Fonte: CANDIDO et al, 2010.

Foi realizada uma análise comparativa dos resultados de velocidade média do ar obtidos nas simulações com os valores encontrados por Candido *et al* (2010) capazes de proporcionar conforto térmico aos usuários sob determinadas condições de temperatura do ar. O objetivo desta análise é identificar o potencial que as configurações de abertura simuladas neste trabalho possuem de proporcionar ou não conforto térmico aos usuários.

Dentre os dados de velocidade média encontrados em cada modelo simulado nesta tese foram identificados aqueles acima de 0,4m/s, pois a partir deste valor a velocidade seria capaz de proporcionar conforto térmico em situações com temperatura operativa a partir de 22,5°C, com 90% de aceitabilidade quanto ao movimento do ar, como se pode ver no gráfico da **Figura 46**. Foi feito o cálculo da frequência com a qual esses valores aparecem em cada modelo, verificando em qual modelo esta frequência foi maior e, portanto classificando-o como o modelo com maior potencial de proporcionar conforto térmico, a depender da temperatura operativa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para uma melhor organização dos resultados obtidos nesta tese, este capítulo encontra-se dividido em duas grandes seções, uma para análise dos resultados qualitativos, que tratam basicamente das características da distribuição do fluxo de ar nos apartamentos, e outra para análise dos dados quantitativos que trazem os valores de velocidade média do ar obtidos nas simulações.

4.1 Análise Qualitativa

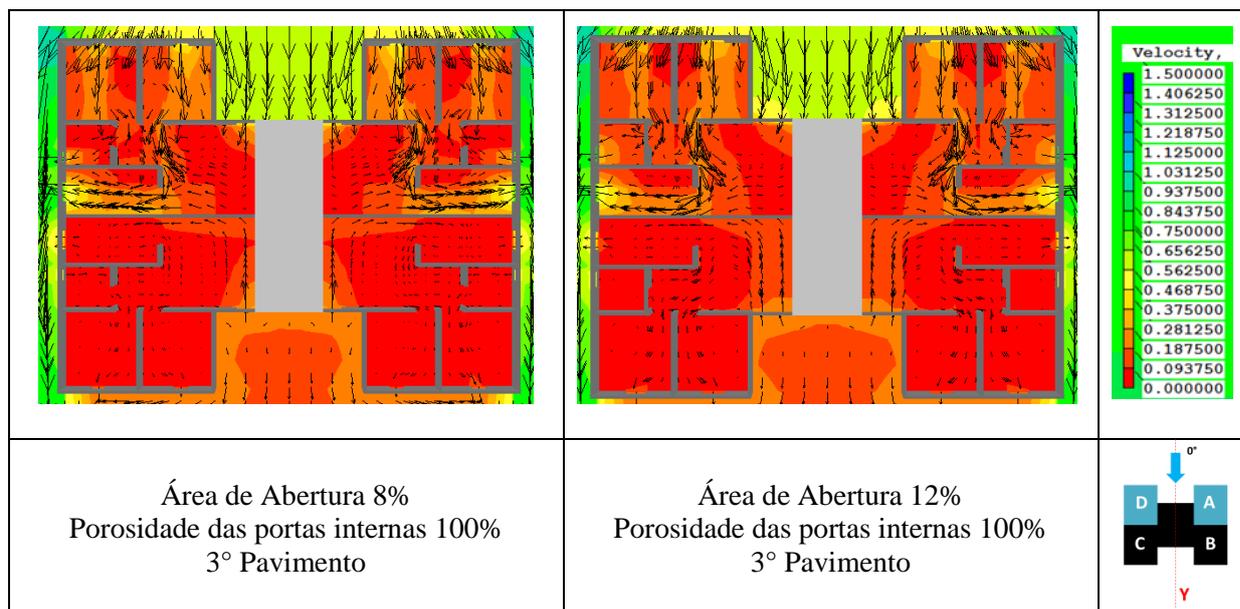
A análise qualitativa encontra-se dividida de acordo com os três ângulos de incidências considerados e foi realizada com base nas imagens extraídas do programa computacional utilizado. As imagens foram dispostas duas a duas para fins comparativos, juntamente com a escala de velocidades utilizada e as informações de identificação de cada modelo. Foram selecionadas as imagens mais representativas dentre as inúmeras imagens coletadas nas simulações.

A identificação de cada apartamento, assim como de cada ambiente das unidades habitacionais pode ser melhor visualizada na **Figura 32**.

4.1.1 Incidência do vento a 0°

Nos apartamentos A e D o vento penetra no edifício pelas janelas dos quartos e da sala e as aberturas da cozinha e do banheiro funcionam como saída, o que seria considerado um fluxo adequado de ventilação natural em residências. Os apartamentos B e C ficam com a ventilação natural comprometida por estarem localizados a sotavento. Ainda assim, percebe-se que há movimento do ar entrando pela janela da sala e saindo pela cozinha nestes apartamentos (**Quadro 9**).

Quadro 9- Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 8% e 12% de área de abertura em relação à área de piso. Incidência 0°.



Fonte: Elaborado pela autora.

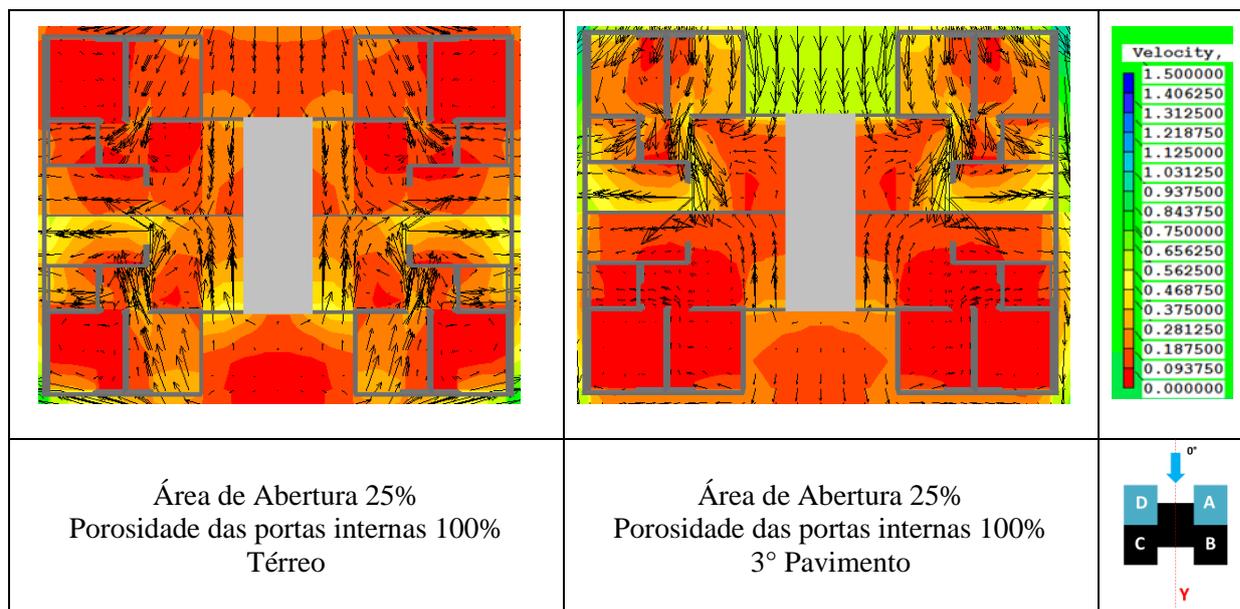
Não se verifica diferenças significativas no padrão de escoamento do vento nos modelos com 8% e 12% da área de abertura em relação à área de piso. Percebe-se apenas que nos apartamentos a sotavento, B e C o movimento de ar no modelo com aberturas iguais a 12% da área dos pisos é maior do que no modelo com 8% (**Quadro 9**).

Com as áreas de aberturas maiores, sendo 25% da área do piso dos ambientes, a distribuição do ar ocorre de maneira mais ampla, porém seguindo o mesmo percurso, entrando pelos quartos e sala e saindo pela cozinha e banheiro (**Quadro 10**).

Quando comparados os padrões de distribuição deste modelo no térreo e no terceiro pavimento percebe-se que:

- A distribuição de ventilação nos apartamentos A e D ocorre de maneira bem mais fluida no terceiro pavimento;
- A entrada de ventilação natural é maior no quarto 2 do que no quarto 1 em ambos os modelos;
- No térreo, as velocidades nos apartamentos a sotavento, são maiores quando comparadas às dos apartamentos a sotavento do terceiro pavimento. Isto ocorre devido à força de sucção ocasionada pelas pressões negativas geradas no pavimento térreo. Nestes casos, o vento penetra principalmente pelas janelas da sala e do quarto 2, saindo pelo banheiro e pela cozinha.

Quadro 10 - Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 25% área de abertura em relação à área de piso: térreo e 3º pavimento. Incidência 0°.

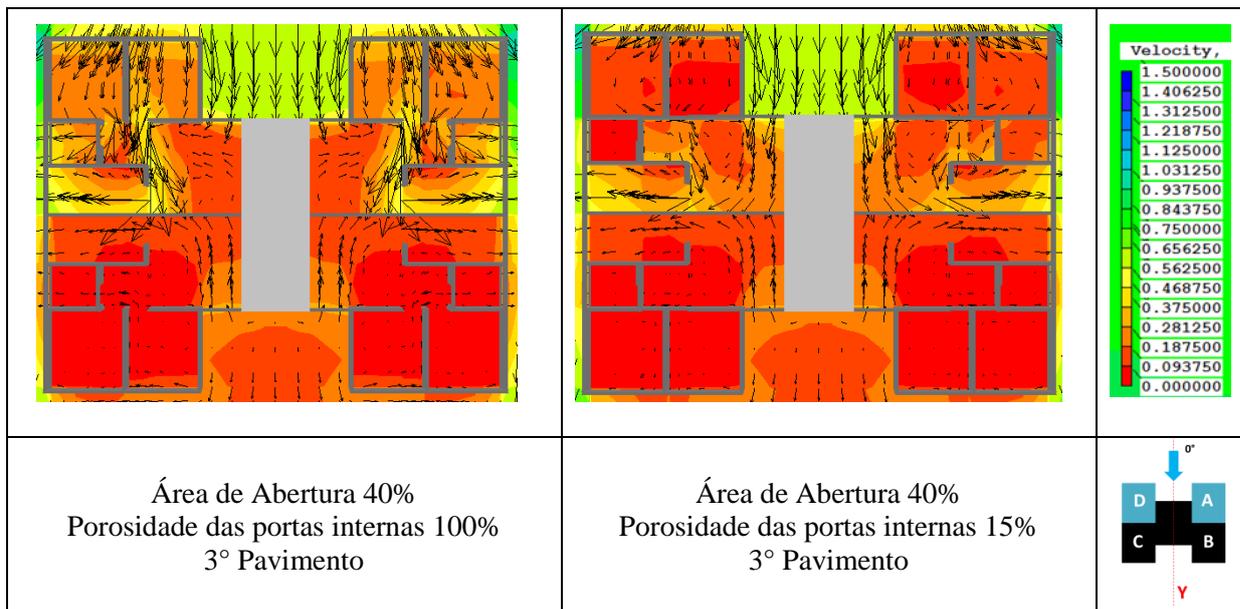


Fonte: Elaborado pela autora.

Quanto à diferença de porosidade das portas internas, fica claro através dos resultados, a influência que as portas têm no padrão de escoamento do vento interno. Verifica-se que a entrada de ventilação através das janelas dos quartos é bem maior no modelo com porosidade das portas de 100% do que no modelo onde as portas possuem porosidade de 15%. Neste último, o fluxo ocorre da janela da sala para a janela da cozinha, já que as portas dos quartos e banheiros estão fechadas. As imagens foram extraídas a 1,5m do chão.

Isto reforça a necessidade de aberturas intermediárias, entre os ambientes, de forma a permitir a ventilação cruzada entre eles, mesmo quando as portas internas estejam fechadas. A adoção de portas internas opacas à ventilação pode comprometer a passagem do fluxo de ar já que na maioria dos casos, a porta é a única abertura de saída do ambiente.

Quadro 11 - Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 40% de área de abertura em relação à área de piso, variando a porosidade das portas internas. Incidência 0° .

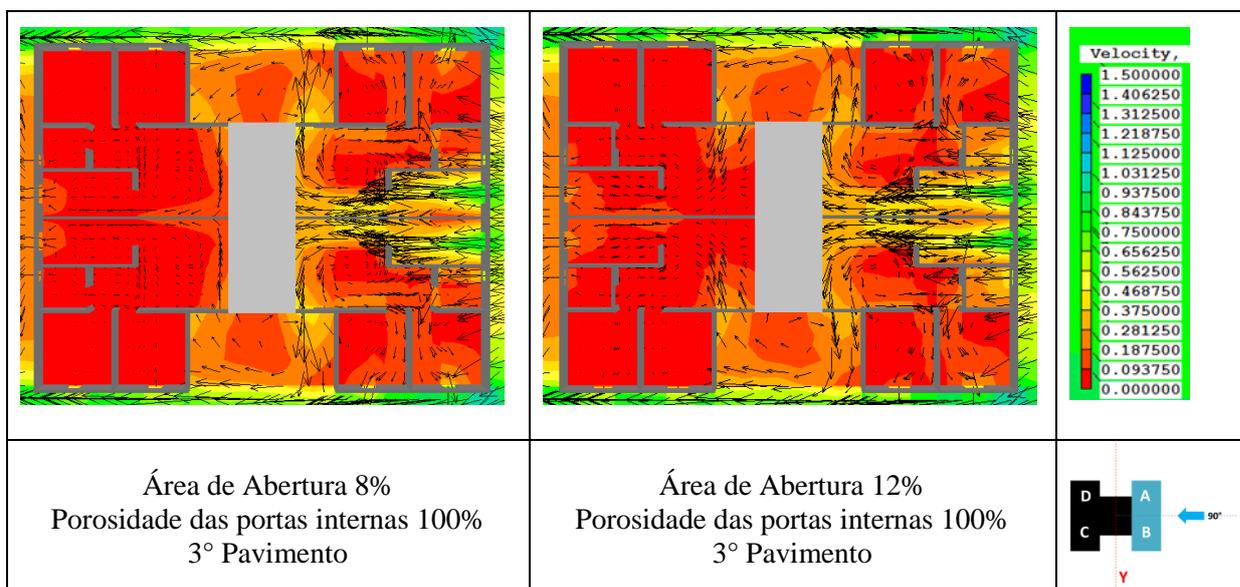


Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.2 Incidência do vento a 90°

A 90° o vento penetra nos apartamentos A e B pelas janelas da cozinha e do banheiro, saindo pelas janelas da sala dos quartos. Os apartamentos C e D são prejudicados por se situarem a sotavento. Mas é possível perceber que a reentrância existente no edifício gera uma zona de sucção que faz com que o vento penetre pela janela da sala desses apartamentos, saindo pela cozinha (**Quadro 12**).

Quadro 12 - Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 8% e 12% de área de abertura em relação à área de piso. Incidência 90° .

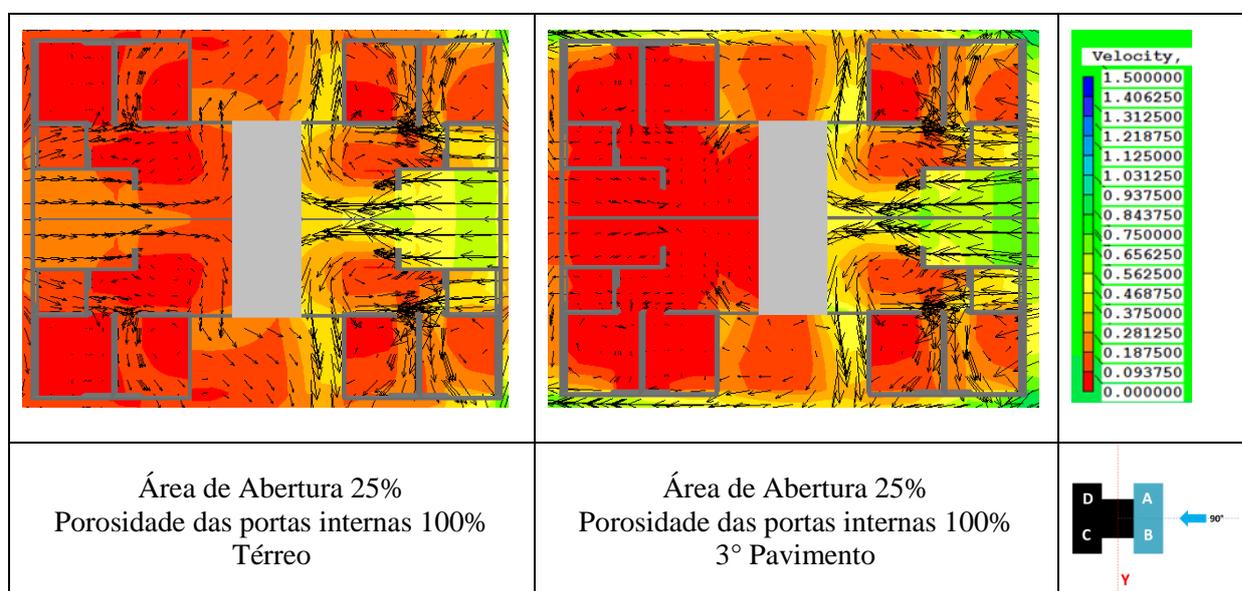


Fonte: Elaborado pela autora.

O padrão de escoamento do vento é bastante semelhante nos modelos com 8% e 12% de área de abertura em relação à área de piso. Nos quartos dos apartamentos A e B percebe-se uma área de esteira de vento que, a depender da distribuição do mobiliário, poderia prejudicar o resfriamento fisiológico dos usuários.

Nos modelos com 25% e 40% de área de abertura em relação à área de piso, o percurso do vento é semelhante (**Quadro 13**; **Quadro 14**). O vento penetra principalmente pela cozinha dos apartamentos A e B e sai pela janela na sala. A janela do banheiro também funciona como abertura de entrada e o vento que sai de lá penetra nos quartos. Nota-se que a ventilação abrange uma área maior do quarto 1 do que do quarto 2 nesse caso.

Quadro 13 - Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 25% área de abertura em relação à área de piso: térreo e 3º pavimento. Incidência 90°.

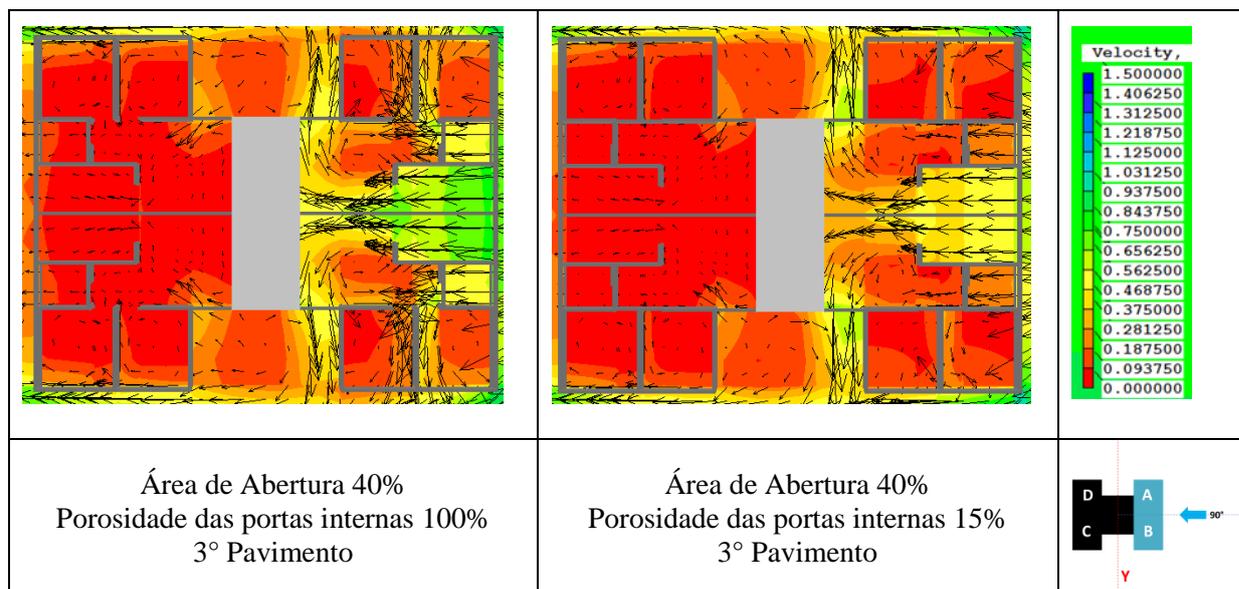


Fonte: Elaborado pela autora.

No térreo a ventilação penetra pelas janelas da cozinha e banheiro e sai pela janela da sala e do quarto 2 dos apartamento A e B. Assim como com a incidência 0°, a distribuição do ar e as velocidades são maiores nos apartamentos a sotavento no térreo do que no terceiro pavimento devido à força de sucção ocasionada pela proximidade com o solo (**Quadro 13**).

Por fim, comparando-se os modelos com diferentes porosidades das portas internas, percebe-se que também para esta orientação o efeito desta variável é determinante no desempenho da ventilação natural nos ambientes. Os quartos são os ambientes mais prejudicados, pois com a porosidade de suas portas reduzidas a 15%, o vento penetra na cozinha e vai direto para sala de estar, saindo pela janela deste ambiente sem passar pelos quartos (**Quadro 14**).

Quadro 14 - Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 40% de área de abertura em relação à área de piso, variando a porosidade das portas internas. Incidência 90°.



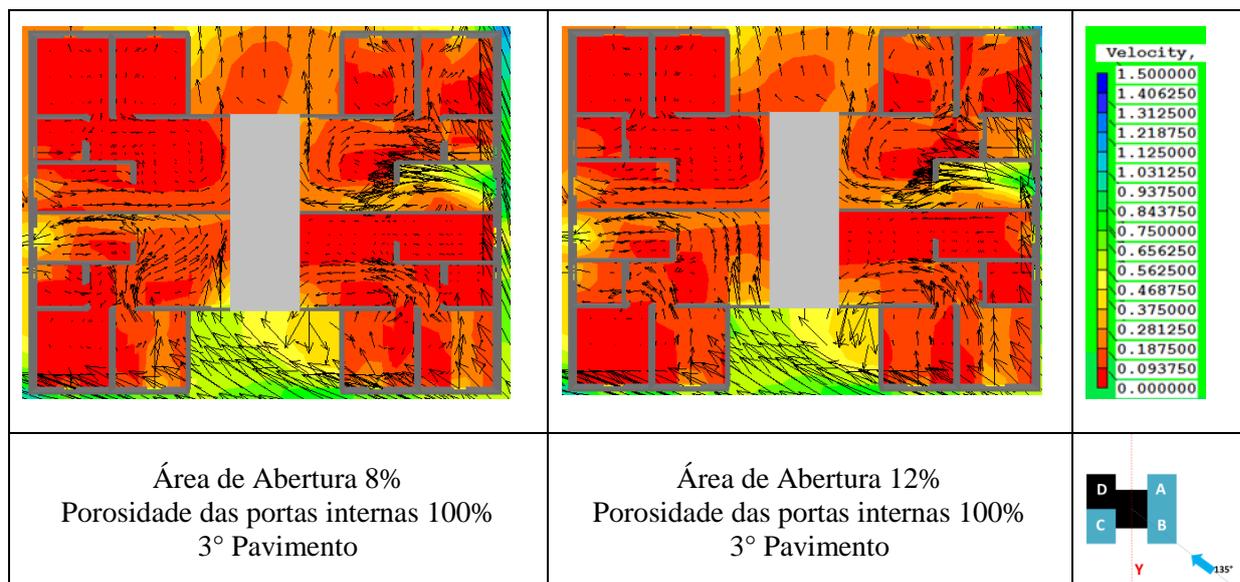
Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.3 Incidência do vento 135°

De maneira geral, verificou-se, que com o vento incidindo a 135°, os apartamentos A, B e C foram favorecidos com melhor distribuição do fluxo e velocidades mais altas de vento nos ambientes. A reentrância existente na forma do edifício neste caso facilitou a entrada de ar pela janela da sala no apartamento C, ocorrendo a saída pela janela da cozinha e do banheiro. Nos quartos como só há uma abertura de entrada, as portas funcionam como abertura de saída, canalizando a saída do ar pelo banheiro e cozinha. Já no apartamento A o ar entra pela cozinha que está posicionada a barlavento e sai pela janela da sala e dos quartos, o que não seria o ideal, visto que o ar que passa pela cozinha e banheiro pode carregar mau cheiro e gordura dos alimentos, por exemplo (**Quadro 15**).

No apartamento B o vento penetra principalmente pelas janelas dos quartos e a janela da sala funciona como abertura de saída. A ventilação natural da cozinha e do banheiro neste apartamento fica comprometida. Já o apartamento D é o que tem o pior resultado para esta orientação, mas ainda é possível perceber o fluxo de ar que entra pela janela da sala, gerado por uma força de sucção que faz com que o ar penetre no edifício saindo pela cozinha do apartamento (**Quadro 15**).

Quadro 15 - Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 8% e 12% de área de abertura em relação à área de piso. Incidência 135°.

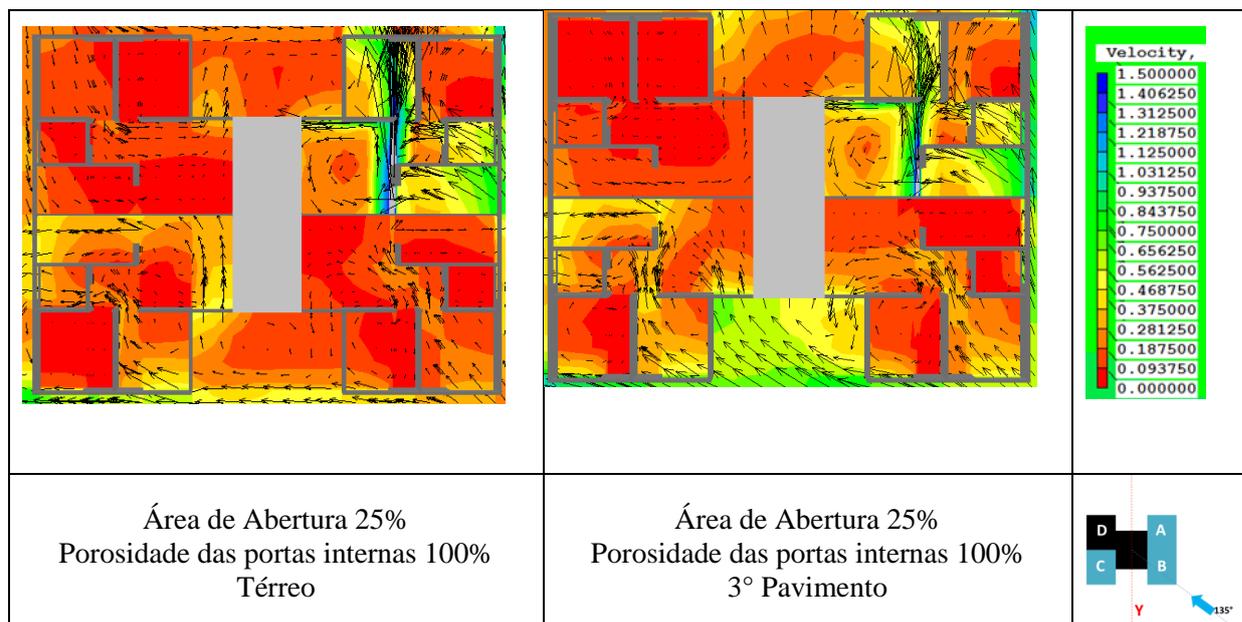


Fonte: Elaborado pela autora.

No modelo com 12% de área de abertura em relação à área de piso, ocorre o mesmo percurso só que o vento que sai do quarto 2 penetra mais no banheiro e não na sala como ocorre no modelo anterior. Isto porque a pressão gerada na janela do banheiro é maior neste segundo, devido às maiores dimensões da esquadria.

Nos modelos com aberturas de janela de 25% e 40% em relação à área do piso, o fluxo de vento sofreu algumas modificações em relação aos modelos com menor área de abertura (**Quadro 16; Quadro 17**). As aberturas de entrada nos apartamentos A e B continuam sendo a cozinha e o banheiro, porém devido a uma maior pressão ocasionada pelo aumento das aberturas ocorre um corredor de vento entre a sala e o quarto 2 que não acontecia nos modelos anteriores. No apartamento C o campo de maior velocidade que existia próximo à janela da cozinha, na saída do ar, se amplia por quase todo o ambiente. Nos quartos a ventilação cruzada ocorre de maneira mais clara, diminuindo a sombra de vento existente. Fica claro nas simulações que a velocidade do ar aumenta com o aumento da área das aberturas.

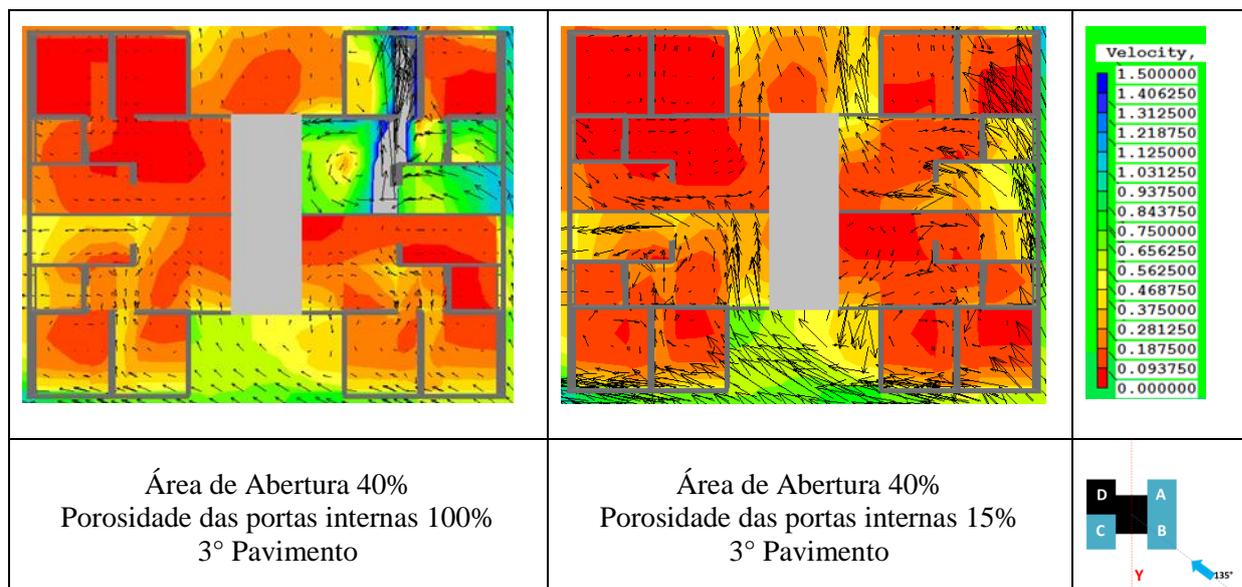
Quadro 16 – Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 25% área de abertura em relação à área de piso: térreo e 3º pavimento. Incidência 135°.



Fonte: Elaborado pela autora.

Percebe-se que o padrão de escoamento é mais fluido no terceiro pavimento do que no térreo, assim como acontece nas outras incidências do vento, uma vez que a velocidade do vento é maior no terceiro pavimento do que no térreo. Quanto à porosidade das portas internas, mais uma vez fica evidente a importância desta variável no desempenho da ventilação natural, tanto para que o ar se distribua de maneira mais uniforme pelos ambientes como acontece no modelo com 40% de área de abertura e 100% de porosidade das portas internas, quanto para que velocidades mais altas sejam alcançadas e assim a ventilação possa proporcionar melhores condições de conforto térmico aos usuários (**Quadro 17**).

Quadro 17 – Distribuição do fluxo de ar nos modelos com 40% de área de abertura em relação à área de piso, variando a porosidade das portas internas. Incidência 135°.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.1.4 Síntese da análise qualitativa

A análise qualitativa das simulações evidenciou que a orientação do edifício em relação aos ventos dominantes na região modifica significativamente o fluxo do vento no interior da edificação.

Em relação aos ambientes mais favorecidos em cada incidência de vento, observou-se que para incidência de 0° as maiores velocidades foram encontradas na cozinha. Com o vento a 90° os ambientes que obtiveram maiores velocidade do ar foram a cozinha e a sala. E para o vento incidindo a 135° os ambientes mais favorecidos foram quarto 1 e sala. Isto ocorreu devido ao posicionamento dos ambientes em relação aos ventos simulados neste tipo de edifício.

Em uma análise geral, portanto, considera-se que a orientação em relação ao vento incidente a 135° é favorável em relação às demais orientações, em edifícios de forma quadrada e com plantas rebatidas como no caso analisado. Isto porque os valores de velocidade do ar alcançados são maiores e a distribuição do fluxo de ar não é tão heterogênea entre os apartamentos como nos outros casos. Observou-se também que o formato “H” do edifício e as aberturas das salas dos quatro apartamentos posicionadas na reentrância favoreceram a ventilação natural na maioria dos apartamentos, devido à diferença de pressão gerada nesta incidência.

4.2 Análise Quantitativa

A análise quantitativa foi subdividida de acordo com os parâmetros de ventilação investigados nesta tese: velocidade do ar externa, área de abertura, relação entre áreas de abertura de entrada e saída e porosidade das portas internas. Para esta análise foram selecionados os dados mais significativos da pesquisa, mostrando gráficos comparativos. Dando continuidade à análise quantitativa, foi realizada a análise dos coeficientes de velocidade, entendidos como a relação da velocidade interna pela velocidade externa na mesma altura, análise da aceitabilidade do movimento do ar, todas com base nos valores de velocidade obtidos nas simulações.

4.2.1 Velocidade do ar externa

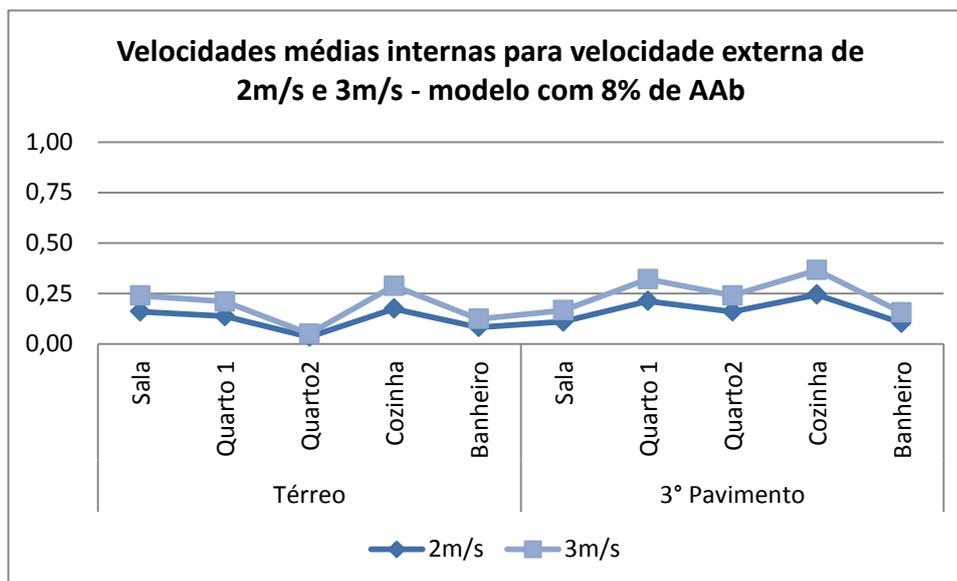
Como os dados de velocidade média do ar interna, resultantes dos modelos simulados com velocidade do ar externa de 2m/s, foram de maneira geral baixos, foram realizadas simulações de dois modelos, representando o pior e o melhor caso, com um aumento da velocidade do ar de 2m/s para 3m/s. Os modelos simulados foram:

1. Modelo com 8% de área de abertura em relação à área de piso e incidência do vento 0°, representando o pior caso já que as velocidades internas mais baixas foram encontradas nesta situação.
2. Modelo com 40% de área de abertura em relação à área de piso e incidência de 135°, representando o melhor cenário, já que os valores mais altos de velocidade interna do ar foram obtidos nesta situação. Nos dois modelos as portas foram mantidas com 100% de porosidade.

Os resultados mostraram que a velocidade do ar foi maior em 150% no modelo com 8% de área de abertura em relação à área de piso para o pavimento térreo e 147% para o 3° pavimento do mesmo modelo. No modelo com 40% de área de abertura em relação à área de piso os resultados foram ainda maiores, com um acréscimo de 234% no térreo e 155% no terceiro pavimento.

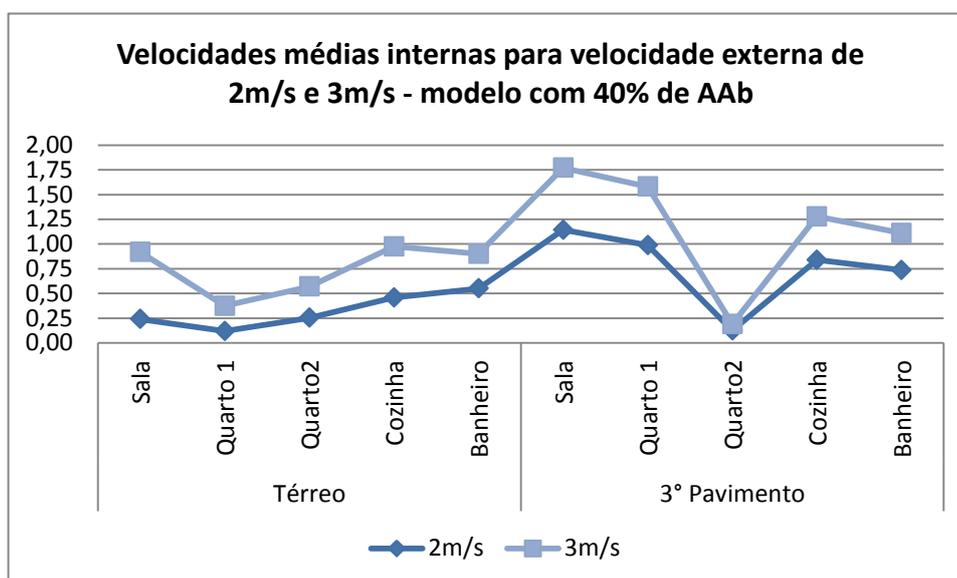
Os gráficos a seguir (**Figura 47**; **Figura 48**) mostram os valores médios de velocidade do ar obtidos nos ambientes do apartamento A comparando os modelos em relação à velocidade do ar externa de entrada.

Figura 47 – Gráfico de velocidade médias do ar no apartamento A no modelo com 8% de área de abertura, simulado com duas velocidades de vento externo; 2 e 3 m/s.



Fonte: Elaborado pela autora.

Figura 48 - Gráfico de velocidade médias do ar no apartamento A no modelo com 40% de área de abertura, simulado com duas velocidades de vento externo; 2 e 3 m/s.



Fonte: Elaborado pela autora.

A maior parte das simulações realizadas neste trabalho levou em consideração uma situação bastante típica de implantação de edifícios habitacionais nas cidades brasileiras: centro de cidade e velocidade externa de 2m/s, que foi o valor mais frequente entre as velocidades médias das capitais brasileiras. Entretanto, muitas vezes, os edifícios são localizados em áreas suburbanas, sem a presença de muitos obstáculos ao vento ou em

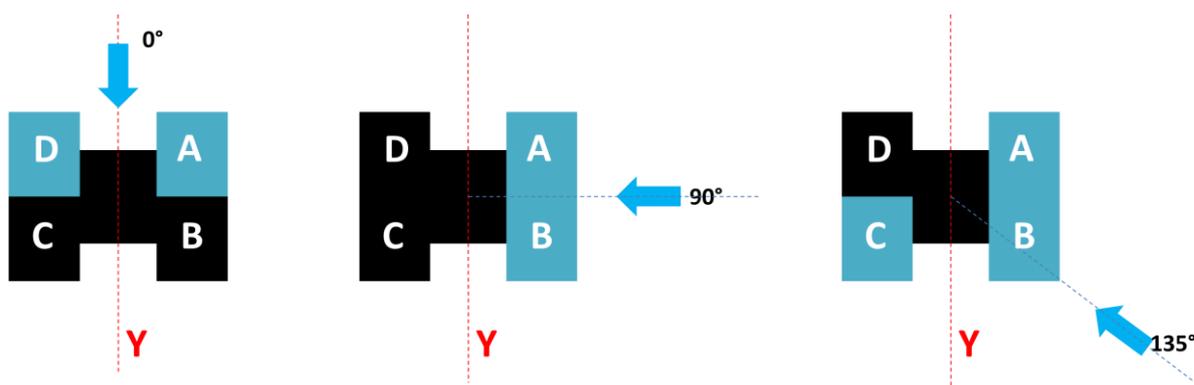
cidades com velocidades mais altas e isto pode melhorar significativamente as condições de ventilação interna. Estas simulações, modificando a velocidade do ar externo, mostraram que a disponibilidade de vento no local de implantação, bem como a velocidade do ar no entorno do edifício pode modificar a condição de ventilação natural no interior das unidades habitacionais e este deve ser um fator a ser considerado pelos projetistas.

4.2.2 Área de abertura

Os resultados apresentados a seguir, foram obtidos considerando a velocidade do ar de entrada no programa de 2m/s, e a configuração das condições do entorno considerando a situação centro de cidade conforme explicitado no item 3.2.3.

De maneira geral, os valores de velocidade média do ar nos ambientes foram mais altos nos modelos com maior área de abertura e também nos modelos com maior porosidade das portas internas. Nas simulações com incidência de vento a 0° os apartamentos A e D ficam a barlavento, nas simulações com vento a 90° os apartamentos a barlavento foram o A e o B enquanto nas simulações com o vento incidindo a 135° , os apartamentos A, B e C ficam em posição favorável (**Figura 49**). Desta forma, utilizou-se para fins comparativos, os dados do apartamento A, já que nas três incidências os dados mais altos de velocidade do vento foram encontrados neste apartamento.

Figura 49 – Incidências de vento analisadas e os apartamentos privilegiados em cada caso.

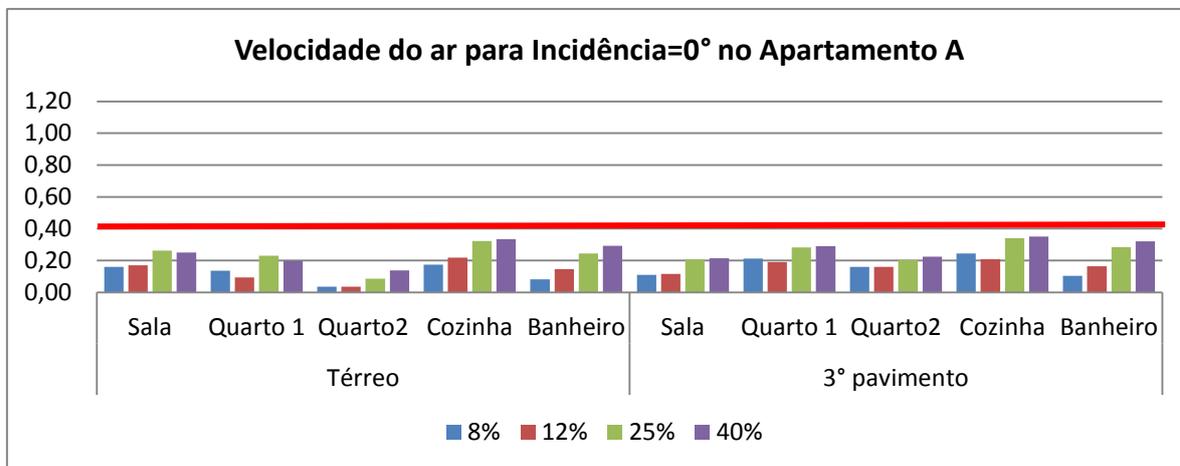


Fonte: Elaborado pela autora.

Como era de se esperar, nas simulações com incidência de vento a 0° os valores foram os mais baixos, ficando entre 0,04 m/s e 0,35 m/s. A maior velocidade média encontrada nas simulações com incidência de 0° foi de 0,35m/s, nas cozinhas dos apartamentos A e D nos modelos com 40% de área de abertura em relação à área de piso e com porosidade das portas

igual a 100%. Já os valores médios mínimos foram encontrados nos banheiros dos apartamentos B e C nos modelos com apenas 8% de área de abertura (**Figura 50**).

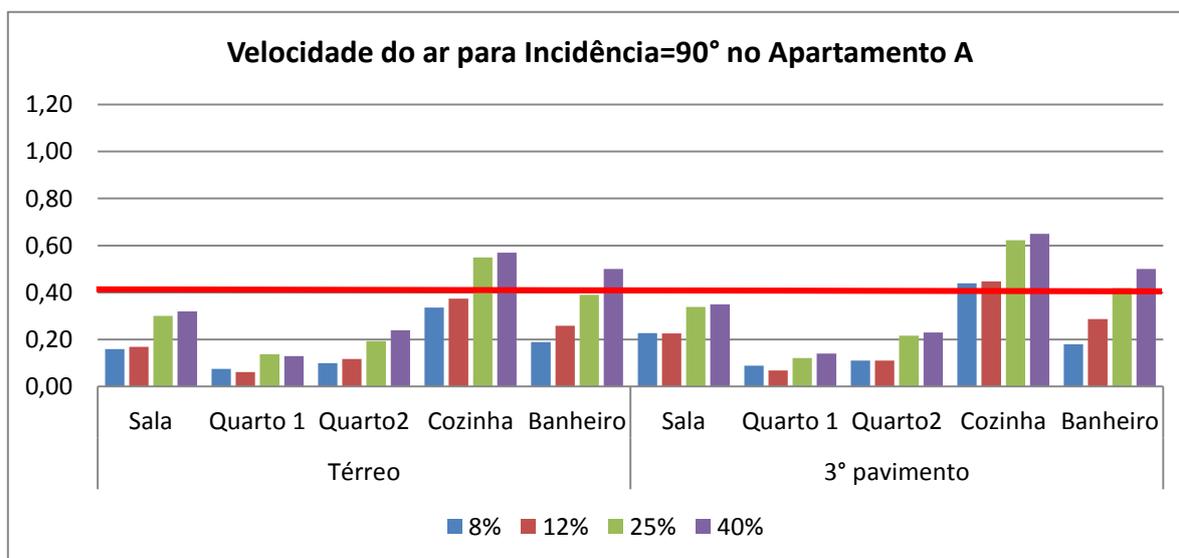
Figura 50- Gráfico da velocidade do ar para incidência 0° no apartamento A.



Fonte: Elaborado pela autora.

A velocidade média mais alta encontrada nas simulações com incidência a 90° foi de 0,66m/s na cozinha do apartamento A no terceiro pavimento, com aberturas correspondendo a uma área de 40% da área do piso e porosidade das portas internas de 100%. E os valores médios mínimos foram obtidos com as aberturas equivalentes a 8% da área do piso, nos quartos dos apartamentos C e D com porosidade interna das portas de 15% e 25% (**Figura 51**).

Figura 51- Gráfico da velocidade do ar para incidência 90° no apartamento A.

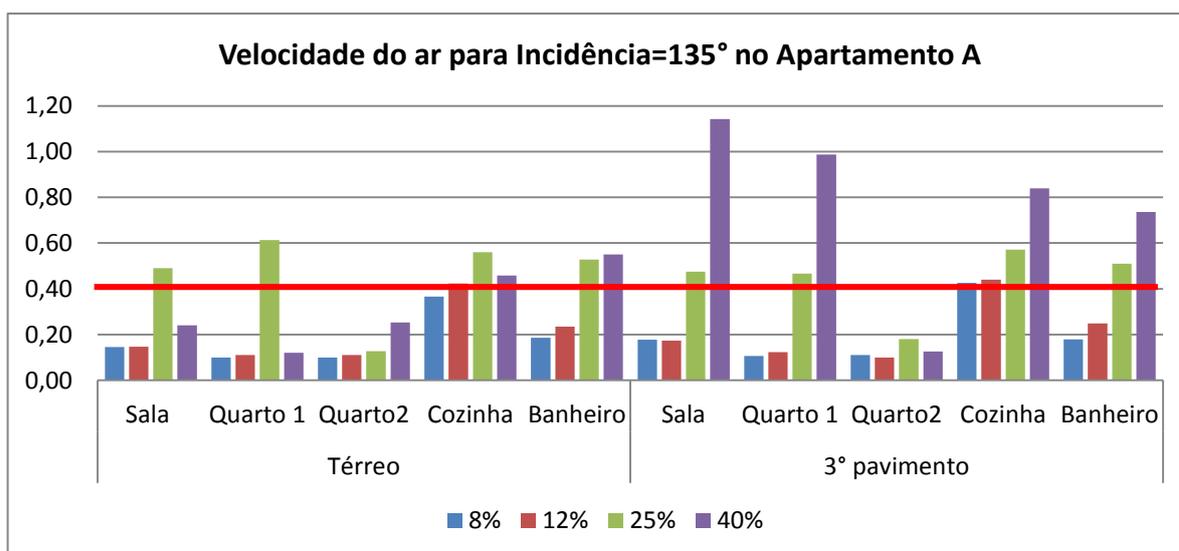


Fonte: Elaborado pela autora.

Percebe-se que no quarto 1 as velocidades nos modelos com área de abertura igual a 8% foram maiores em 0,02 m/s do que nos modelos com área de abertura igual a 12% da área de piso dos ambientes, enquanto que nas salas e na cozinha do 3° pavimento esses valores foram iguais. Isso mostra que o aumento de 8% pra 12% da área de abertura em relação à área do piso dos ambientes não representa incrementos significativos de velocidade do ar nos ambientes internos para esta incidência de vento no caso examinado.

Nas simulações com incidência de vento a 135°, os valores foram os mais altos dentre as três incidências simuladas, mantendo-se entre 0,10 m/s e 1,14m/s. Os valores mais altos foram encontrados nos modelos com 40% da área de abertura em relação a área de piso, principalmente nos ambientes sala, quarto 1, cozinha e banheiro do terceiro pavimento (Figura 52).

Figura 52 – Gráfico da velocidade do ar para incidência 135° no apartamento A.



Fonte: Elaborado pela autora.

Observa-se que no térreo, entretanto, o modelo com 25% de área de abertura em relação à área do piso apresentou maiores velocidades do ar internas na sala, quarto 1 e cozinha. Isto pode ter ocorrido porque o percentual de área de abertura de entrada em relação ao percentual de área de saída é maior neste modelo, ou seja, ele possui maior potencial de ventilação cruzada do que o modelo com áreas de abertura iguais a 40% das áreas de piso. Observa-se, portanto, que a dimensão das aberturas não pode ser considerada isoladamente, mas outros fatores podem ser determinantes no desempenho da ventilação natural. Maiores discussões sobre a ventilação cruzada nos modelos serão realizadas no item 4.1.2.

Por fim, é importante destacar que os percentuais propostos pelas Normas, sempre em relação à área do piso dos ambientes nem sempre são praticáveis, pois muitas vezes, são maiores que a área de parede do ambiente disponível na fachada. Isto ocorreu na sala e no banheiro do modelo analisado, onde, não foi possível abrir uma janela na dimensão recomendada, nos casos de 25% e 40% em relação à área de piso. Nestes casos, as janelas foram dimensionadas considerando a largura máxima proporcionada pela fachada disponível, e mantendo-se a altura da janela padrão do modelo de 1,0m. Os percentuais obtidos, relacionando-se às áreas das aberturas resultantes pelas áreas de piso e de fachada de cada ambiente são listados a seguir (**Quadro 18**).

Quadro 18 – Percentuais de área de abertura em relação ao piso e à fachada dos ambientes.

Ambiente	Área de Abertura/Área de piso	Área de abertura/Área de fachada
Quarto 1 (m ²)	8%	10%
	12%	14%
	25%	30%
	40%	48%
Quarto 2 (m ²)	8%	10%
	12%	14%
	25%	30%
	40%	48%
Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	8%	21%
	12%	10%
	25%	26%
	40%	26%
Banheiro (m ²)	8%	9%
	12%	19%
	25%	19%
	40%	24%

Fonte: Elaborado pela autora.

Nota-se, portanto, que seria mais adequado se as Normas trabalhassem com o percentual da área de abertura em relação à área de fachada do ambiente, evitando este tipo de problema. Esta relação inclusive já é utilizada em diversos estudos para investigar o desempenho térmico de edifícios, e em pesquisas internacionais recebe a sigla *WWR* – *Window Wall Ratio*. Já foi abordada por diversos autores como em Al-Tamimi *et al* (2011), dentre outros.

4.2.3 Relação entre área de aberturas de entrada e área de aberturas de saída na unidade habitacional

De acordo com o Manual do RTQ-R a ventilação cruzada é aquela proporcionada pela existência de aberturas dispostas em diferentes fachadas de uma mesma unidade habitacional, sejam elas opostas ou adjacentes, de modo a proporcionar escoamento do ar através das aberturas que interligam os ambientes desta UH. Esta relação de áreas de abertura de entrada e saída devem atender a proporção de no mínimo 25%, conforme explicitado no item 3.1.3 desta tese.

Esta análise foi realizada nos modelos simulados neste trabalho, verificando que todos os modelos simulados possuem relação entre áreas de abertura de entrada e saída maior do que a recomendada pelo RTQ-R, que é de 25% ($A_2/A_1 \geq 25\%$). Os modelos com 8% de área de abertura em relação à área de piso possuem 50%, os modelos com 12% de área de abertura em relação à área de piso possuem 31%, os modelos com 25% de área de abertura em relação à área de piso possuem 48% e por fim, os modelos com 40% possuem 36% (**Quadro 19**).

Quadro 19 – Percentuais obtidos na relação entre área de aberturas de entrada e saída nas unidades habitacionais dos modelos simulados.

Área de abertura/ Área do Piso	Área de entrada/ Área de saída
8%	50%
12%	31%
25%	48%
40%	36%

Fonte: Elaborado pela autora.

Apesar disto, os resultados mostraram que o percentual de ventilação cruzada por si só não é capaz de garantir a velocidade de ar necessária para promover o conforto térmico dos usuários. Nos modelos onde esse percentual era mais alto, mas as áreas de abertura eram menores os valores de velocidade do ar interna foram baixos, em muitos casos menores que 0,4m/s.

Por outro lado, o modelo que obteve mais frequência de velocidades acima de 0,4m/s foi o modelo com 25% de abertura em relação á área do piso e 48% de ventilação cruzada,

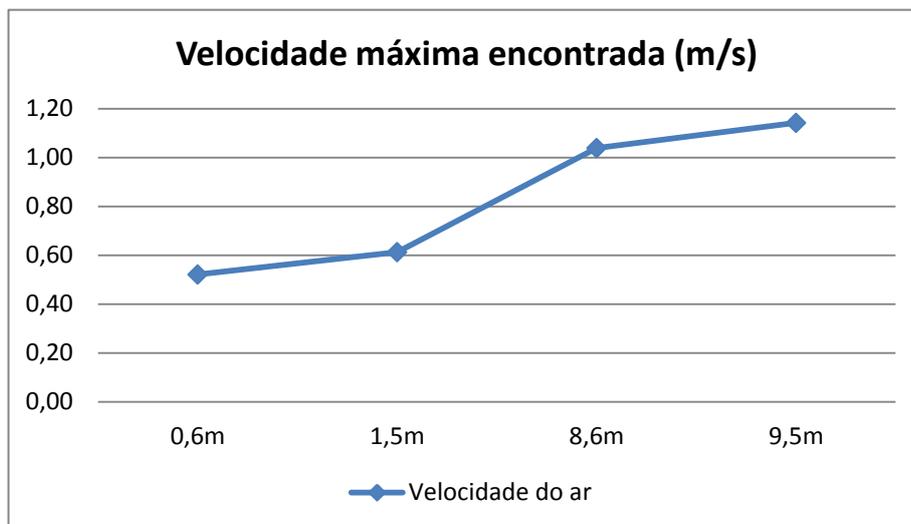
mostrando que área de aberturas maiores combinadas à existência de aberturas de entrada e saída podem surtir um bom resultado no conforto térmico dos usuários.

4.2.4 Porosidade das portas internas

De maneira geral, como era de se esperar os melhores resultados tanto em relação à velocidade do ar nos ambientes internos quanto em relação à distribuição do fluxo de ar ocorreram nos modelos com a porosidade das portas de 100%, ou seja, com a porta e a bandeira totalmente abertas. Entretanto, sabe-se que muitas vezes, por questões de privacidade, as portas dos ambientes são fechadas principalmente durante a noite.

A fim de investigar a influência da porosidade das portas, a velocidade do ar foi analisada em duas alturas: a 0,6m do chão e a 1,5m do chão, no primeiro e no terceiro pavimento do modelo. A 0,6m do chão o maior valor de velocidade média do ar encontrado foi de 0,52m/s e ocorreu no modelo com 25% de área de abertura em relação a área de piso dos ambientes e com porosidade das portas internas de 100%. A 1,5m de altura do chão, o maior valor de velocidade ocorreu no mesmo modelo com 25% de área de abertura e 100% de porosidade das portas internas. O valor foi de 0,61m/s. Tanto a 0,6m quanto a 1,5m do chão os valores mais altos de velocidade encontrados foram registrados no quarto 1.

No terceiro pavimento, a 8,6m do chão, o maior valor encontrado foi de 1,04m/s e ocorreu no modelo configurado com 40% de área de abertura em relação às áreas de piso dos ambientes e porosidade das portas internas de 100%. O mesmo ocorreu a altura de 9,5m do chão, só que o valor encontrado foi um pouco mais alto, de 1,14m/s. Tanto a 8,6m quanto a 9,5m do chão os valores mais altos de velocidade encontrados foram registrados na sala (**Figura 53**). Esta análise mostra que a velocidade média do ar também ocorre em função da altura das aberturas na edificação.

Figura 53 – Valores de velocidade máxima encontrados nas alturas investigadas.

Fonte: Elaborado pela autora.

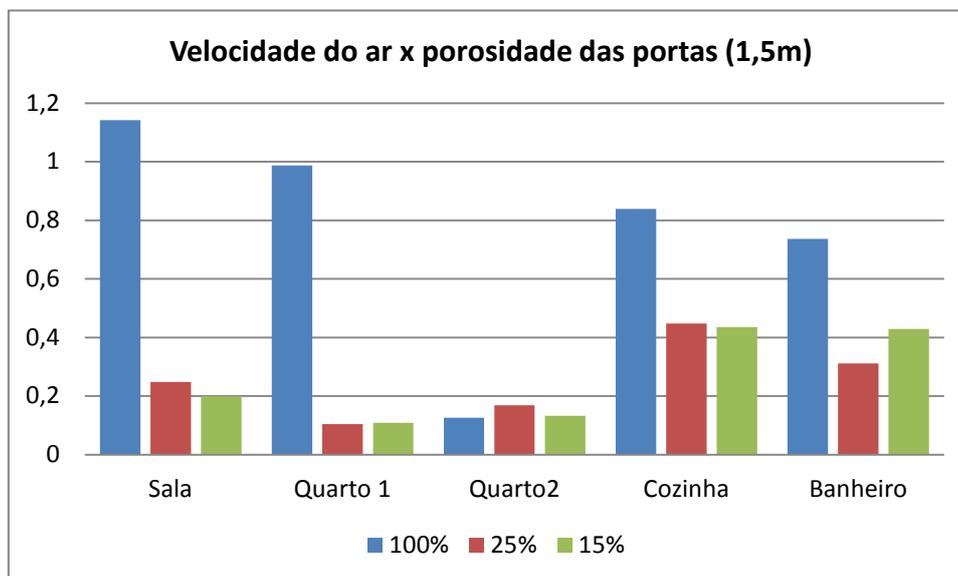
Todos os valores máximos foram encontrados em modelos simulados com o vento a 135° , que foi a incidência que proporcionou velocidades de ar mais altas, e no apartamento C, que devido a orientação e à forma do edifício é o mais favorável em relação aos ventos neste caso.

Com o vento incidindo a 0° os valores mais altos de velocidade do ar foram obtidos a altura de 9,5m do chão, na cozinha dos apartamentos A e D, no modelo com 40% de área de abertura e 100% de porosidade das portas internas. O valor máximo obtido nesta incidência foi de 0,35m/s. Nas simulações com o vento a 90° , o valor mais alto de velocidade do ar foi de 0,66m/s, obtido a altura de 9,5m do chão, na cozinha dos apartamentos A e B, também no modelo com 40% de área de abertura e 100% de porosidade das portas internas.

Por fim, foram comparadas as velocidades do ar nos ambientes internos dos modelos com 40% de área de abertura em relação à área de piso, para incidência de 135° , no terceiro pavimento, que representam o melhor caso em relação aos valores de velocidade do ar obtidos.

Aqueles com 100% de porosidade das portas internas obtiveram velocidades do ar mais altas em todos os ambientes exceto no quarto 2, onde as velocidades dos três modelos foram bem próximas, de aproximadamente 0,2m/s. Isto ocorreu a altura de 1,5m do piso (**Figura 54**).

Figura 54 – Gráfico de velocidades do ar para os três tipos de porosidade das portas a 1,5m do chão.

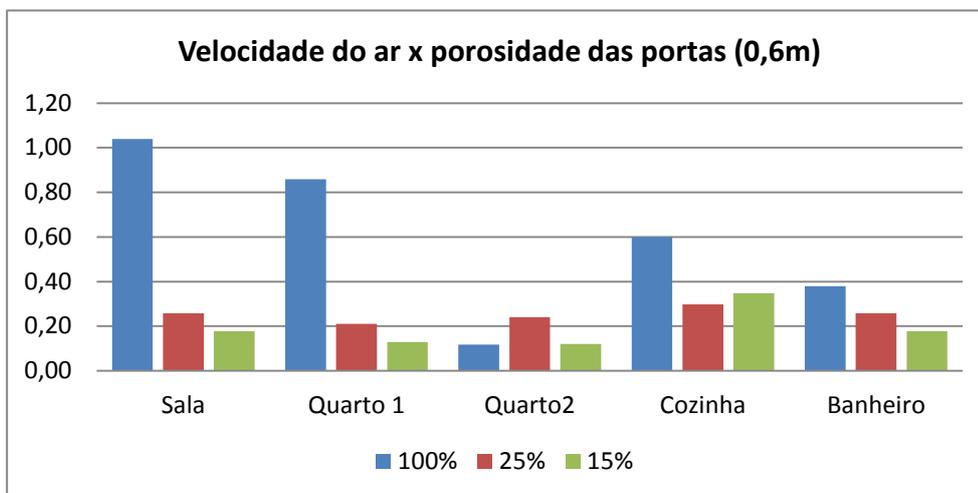


Fonte: Elaborado pela autora.

Observando o percurso do vento neste caso, verificou-se que ele entra pela janela da sala que fica na reentrância do edifício e a porta do quarto 1 quando aberta gera uma diferença de pressão que faz com que o ar penetre em alta velocidade no quarto 1, deixando o quarto 2 com velocidades bem mais baixas. Por esta razão, as velocidades obtidas nos modelos com 25% e 15% de porosidade das portas internas foram mais altas neste ambiente.

O mesmo ocorre a 0,6m do piso, neste mesmo modelo com porosidade das portas internas de 100%, onde a velocidade do ar foi mais alta no quarto 1 do que no quarto 2, só que a esta altura, o modelo com porosidade interna da porta de 25% apresentou velocidade mais alta, de 0,24m/s (**Figura 55**).

Figura 55 – Gráfico de velocidades do ar para os três tipos de porosidade das portas a 0,6m do chão.



Fonte: Elaborado pela autora.

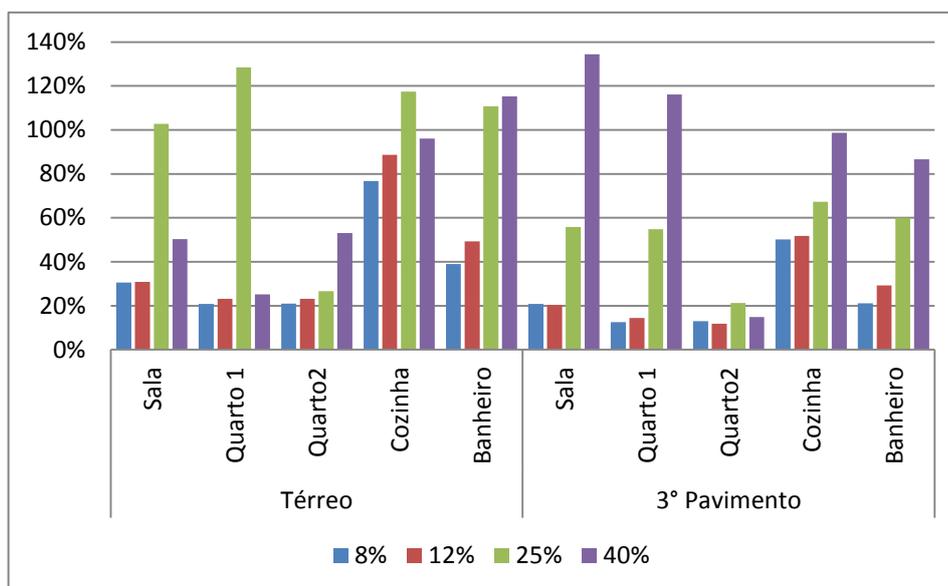
Este foi o único caso em que se verificou aumento da velocidade do ar na altura de 0,6m do piso no modelo em que a porosidade das portas foi igual a 25%, em relação aos modelos com 100% de porosidade das portas internas. A análise em diferentes alturas em relação ao piso mostrou que na maioria dos casos os maiores valores foram verificados a 1,5m do chão. Isto confirma a necessidade de prover elementos que contribuam com a ventilação natural na altura do usuário sentado, como peitoris ventilados, por exemplo, principalmente em ambientes como quartos e salas, para que o vento seja capaz de promover o resfriamento fisiológico dos usuários.

4.2.5 Análise do coeficiente de velocidade

Para análise dos coeficientes de velocidades (CV), foram utilizados dados do apartamento A em todas as incidências que, conforme citado anteriormente, apresentou os melhores resultados de velocidade do ar em todas as orientações simuladas.

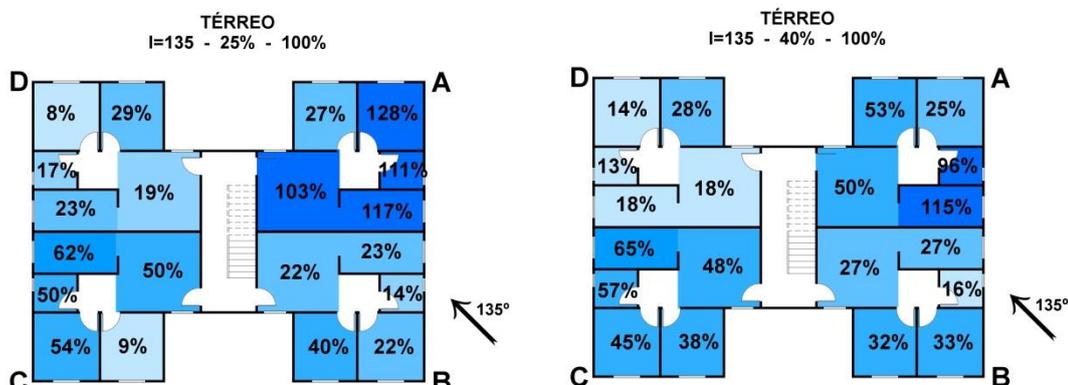
Os melhores CVs foram obtidos com incidência de vento a 135°, alcançando mais de 130% em relação à velocidade média externa. No térreo, o modelo com 25% de área de abertura em relação à área de piso obteve maiores CVs nos ambientes sala, quarto 1 e cozinha, e o modelo com 40% de área de abertura em relação à área de piso obteve maior CV no banheiro. Já no terceiro pavimento, o modelo com 40% de área de abertura apresentou os melhores resultados em todos os ambientes exceto no quarto 2 (**Figura 56**).

Figura 56 – Coeficiente de velocidade com vento a 135°.



Fonte: Elaborado pela autora.

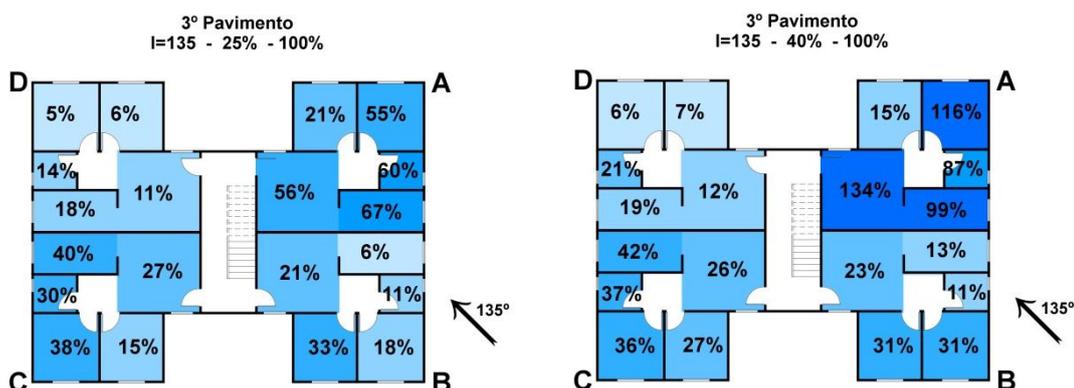
Figura 57 – Velocidades médias internas em relação à velocidade ao ar externo a 135° no térreo: 25% e 40% de área de abertura em relação à área de piso.



Fonte: Elaborado pela autora.

A **Figura 57** mostra que no térreo o modelo com 25% obteve melhores CVs no quarto 1, banheiro, cozinha e sala do apartamento A, em relação ao modelo com 40% de área de abertura em relação à área do piso dos ambientes, com destaque para a sala deste apartamento que passou de 50% para 103%. Já no terceiro pavimento os CVs foram maiores no modelo com 40% de área de abertura em relação à área de piso, conforme citado anteriormente. A **Figura 58** demonstra os percentuais em cada ambiente simulado.

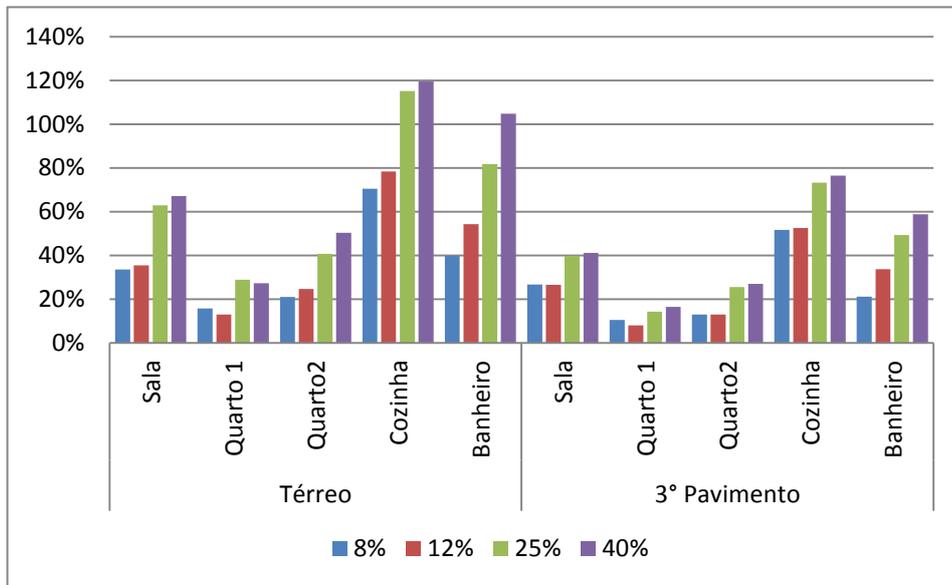
Figura 58 – Velocidades médias internas em relação à velocidade ao ar externo a 135° no 3° pavimento: 25% e 40% de área de abertura em relação à área de piso.



Fonte: Elaborado pela autora.

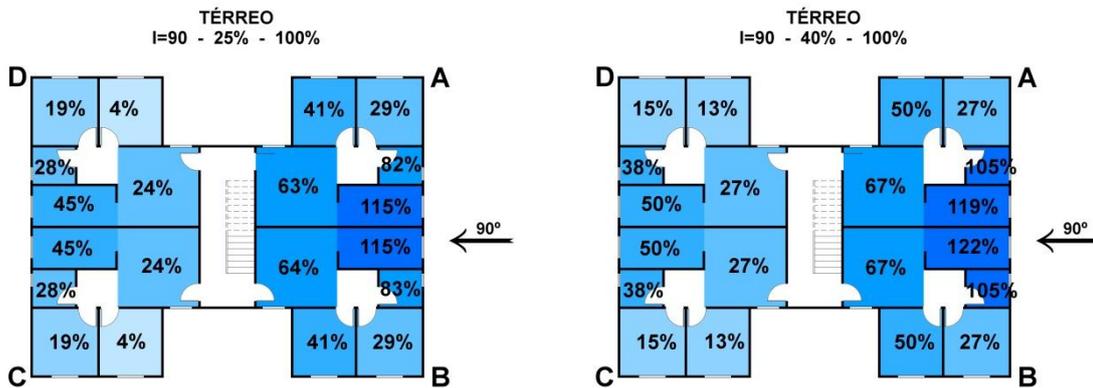
Para 90° de incidência o maior CV foi de 120% no modelo com 40% de área de abertura em relação à área de piso. Os resultados dos modelos com 25% e 40% de área de abertura em relação à área de piso foram bem próximos (**Figura 59**) e os melhores CVs nesta incidência foram obtidos na cozinha, no banheiro e na sala (**Figura 60**).

Figura 59 - Coeficiente de velocidade com vento a 90°.



Fonte: Elaborado pela autora.

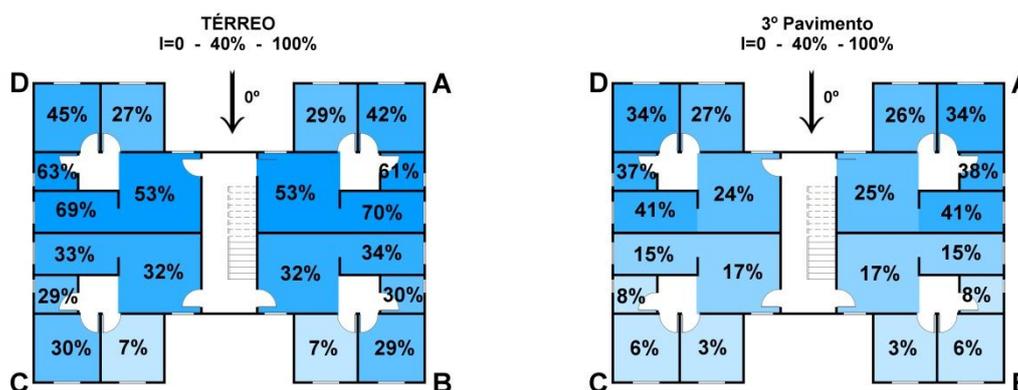
Figura 60 - Velocidades médias internas em relação à velocidade ao ar externo a 90° no térreo: 25% e 40% de área de abertura em relação à área de piso.



Fonte: Elaborado pela autora.

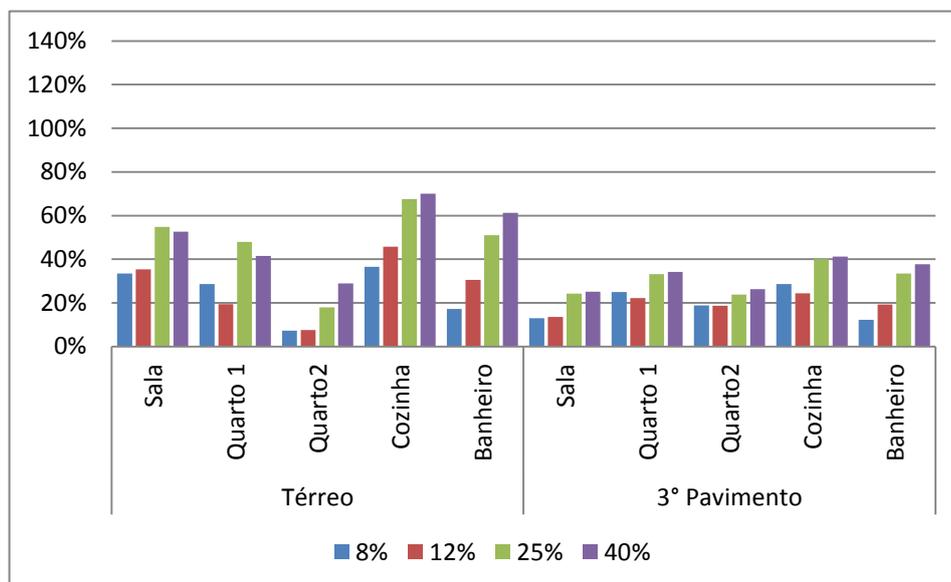
Com o vento a 0° foram obtidos os piores CVs, o percentual máximo foi 70% na cozinha do térreo com as aberturas dimensionadas a 40% em relação às áreas de piso dos ambientes. Observa-se que, para esta incidência, assim como para 90° de incidência, os CVs do térreo foram maiores, em geral, do que os CVs do terceiro pavimento (Figura 61 e Figura 62).

Figura 61 - Velocidades médias internas em relação à velocidade ao ar externo a 0° no térreo e 3º pavimento: 40% de área de abertura em relação à área de piso.



Fonte: Elaborado pela autora

Figura 62 – Coeficiente de velocidade com vento a 0° .

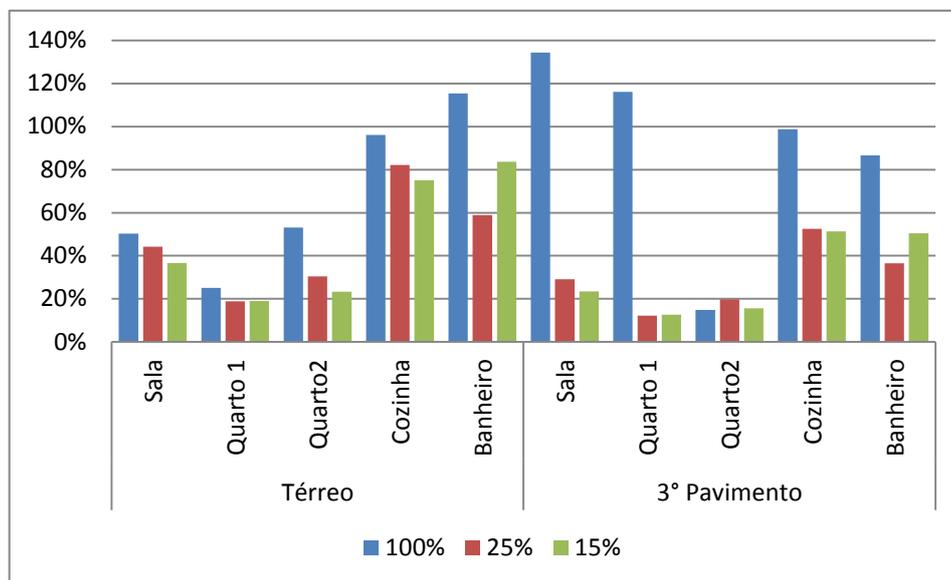


Fonte: Elaborado pela autora.

Em relação à porosidade das portas internas, os maiores CVs foram obtidos no modelo com as aberturas dimensionadas a 40% em relação às áreas de piso dos ambientes e incidência

de vento de 135° conforme já foi visto anteriormente. O maior CV foi de 134% na sala do 3° pavimento e o menor foi de apenas 13% no quarto 1 também no 3° pavimento (**Figura 63**).

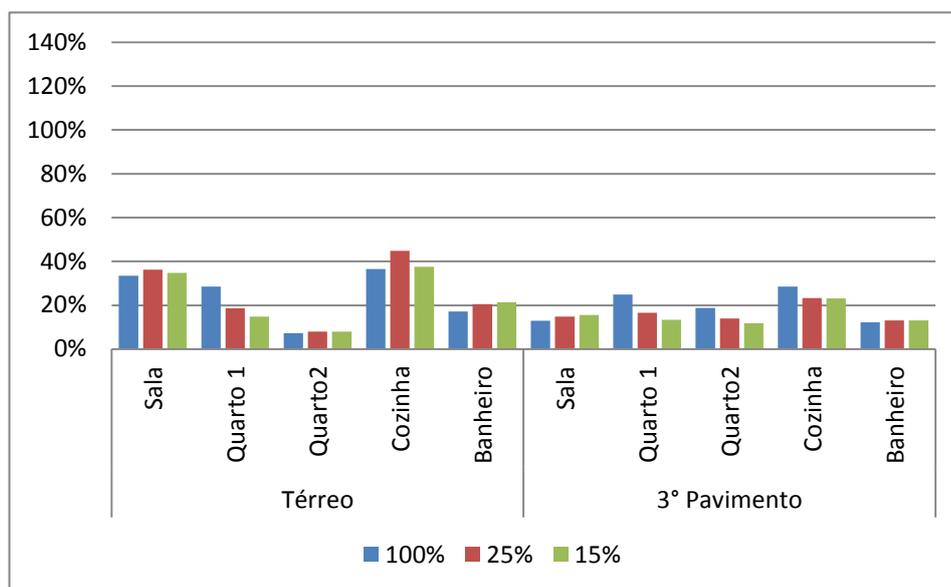
Figura 63 – Coeficiente de velocidade a 0° para modelos com 40% de área de abertura em relação à área do piso, variando a porosidade das portas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Dentre os modelos com 8% de área de abertura em relação às áreas de piso dos ambientes, o que obteve menores CVs foi aquele com incidência de vento a 0°. O menor CV foi obtido no quarto 2 do térreo, sendo de 7% apenas, em relação à velocidade do ar externa (**Figura 64**).

Figura 64 – Coeficiente de velocidade a 0° para modelos com 8% de área de abertura em relação à área do piso, variando a porosidade das portas.



Fonte: Elaborado pela autora.

Outras imagens referentes aos Coeficientes de Velocidade em todos os modelos simulados podem ser visualizadas no Apêndice B.

4.3 Análise da aceitabilidade do movimento do ar

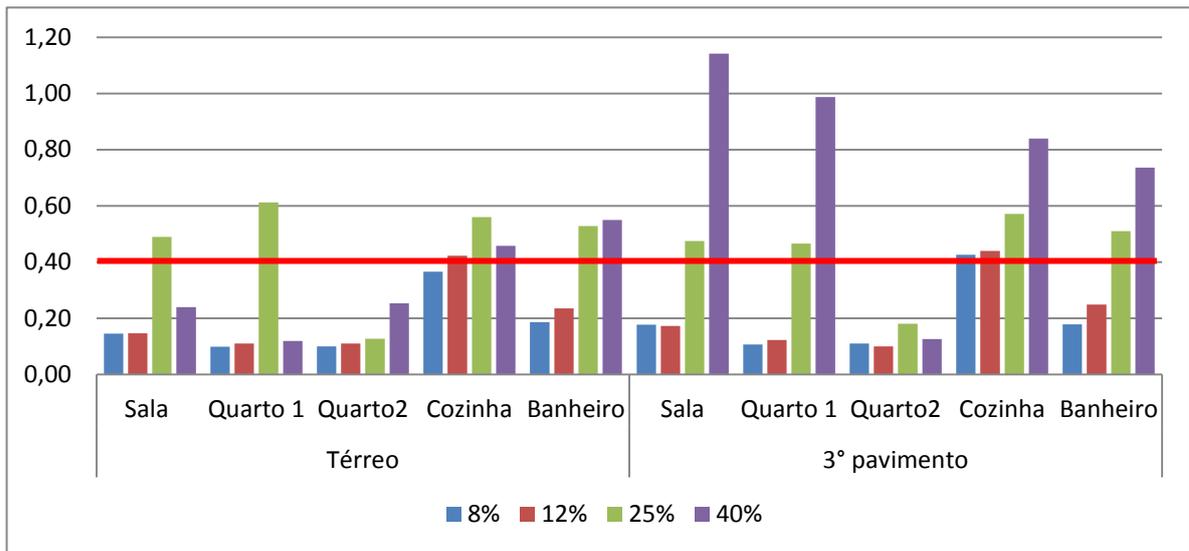
Em geral, as velocidades no interior dos ambientes foram baixas, com pequeno percentual de frequência de valores acima de 0,4m/s. Para os modelos simulados com incidência de 0°, por exemplo, a frequência de valores acima de 0,4m/s foi zero em todos os modelos simulados.

Os valores de velocidade média do ar nos ambientes internos obtidos nas simulações com incidência 90° foram um pouco maiores. O modelo com 8% de área de abertura em relação à área do piso do ambiente com 100% de porosidade das portas internas teve 3% de frequência de valores acima de 0,4m/s. O modelo com 12% de área de abertura em relação à área do piso do ambiente teve a mesma frequência, e o com 25% teve 8% de frequência de valores de velocidade média do ar acima de 0,4m/s. Entretanto, nesta incidência o modelo com mais frequência de ocorrência de valores de velocidade acima de 0,4m/s foi aquele com 40% de área de abertura em relação à área do piso e 100% de porosidade das portas internas, com 10% de frequência.

Conforme visto anteriormente os melhores resultados foram obtidos nas simulações com o vento a 135°, tanto em termos de distribuição do fluxo de ar quanto em termos de velocidades mais altas. Foram nestes casos também, que as velocidades acima de 0,4m/s foram mais frequentes. Esta frequência foi de 11% no modelo com 40% de área de abertura em relação à área do piso e de 18% no modelo com 25% de área de abertura em relação à área do piso, ambos com 100% de porosidade das portas internas.

Apesar do modelo com maiores aberturas ter obtido uma frequência menor de velocidades do ar mais altas que 0,4m/s, os valores obtidos foram mais altos do que no modelo com 25% de área de abertura em relação à área do piso, como se pode verificar no gráfico a seguir (**Figura 65**).

Figura 65 – Gráfico das velocidades do ar por ambiente, variando a dimensão da área de abertura.



Fonte: Elaborado pela autora.

4.4 Parâmetros Normativos para configuração das aberturas

Confirmou-se através dos resultados, que a configuração das aberturas é uma característica fundamental para o desempenho da ventilação natural nas edificações. Ficou claro também que o bom desempenho da ventilação natural não depende apenas de uma característica isolada, como o dimensionamento das aberturas, por exemplo, mas da associação de características como dimensionamento, disposição de áreas de abertura e de saída do vento e porosidade das portas internas, investigadas neste trabalho, que exercem forte influência sobre a ventilação no interior dos edifícios.

Tais características, combinadas com outras que não foram objeto de estudo nesta tese, mas que também são importantes para o desempenho da ventilação natural, tais como: tipologia da esquadria, formato da abertura e principalmente a localização das aberturas, devem ser cuidadosamente definidas pelo projetista para que a ventilação natural possa ser utilizada como estratégia de projeto.

Conforme discutido anteriormente, as Normas atuais não colaboram para que estas decisões sejam tomadas da maneira mais acertada, pois trazem recomendações pontuais, geralmente indicando apenas o dimensionamento das aberturas, ainda assim, de maneira confusa, indicando para uma mesma Zona Bioclimática percentuais de área de abertura totalmente distintos.

Outro aspecto importante das recomendações normativas, é que as diretrizes para dimensionamento das aberturas são feitas em função da área de piso dos ambientes. Dependendo do formato do ambiente, esta relação nem sempre será possível. Por exemplo, quando a NBR 15.220-3 (ABNT, 2005) recomenda uma abertura com 40% da área de piso de um ambiente, este tamanho de abertura não será exequível em uma planta de formato retangular e fachada estreita, impossibilitando o projetista de atender a tal recomendação. Por esta razão, neste trabalho foram analisados os percentuais de abertura tanto em relação à área do piso quanto em relação à área de fachada do ambiente e o que se traz nas recomendações a seguir é a relação da abertura com a fachada.

A fim de colaborar com projetistas, bem como sugerir recomendações que possam ser incorporadas em futuras revisões das normas brasileiras de desempenho térmico, tais como a NBR 15.220 (ABNT, 2005) e a NBR 15.575 (ABNT, 2013), sugere-se a seguir alguns critérios no que diz respeito à configuração as aberturas em edificações residenciais

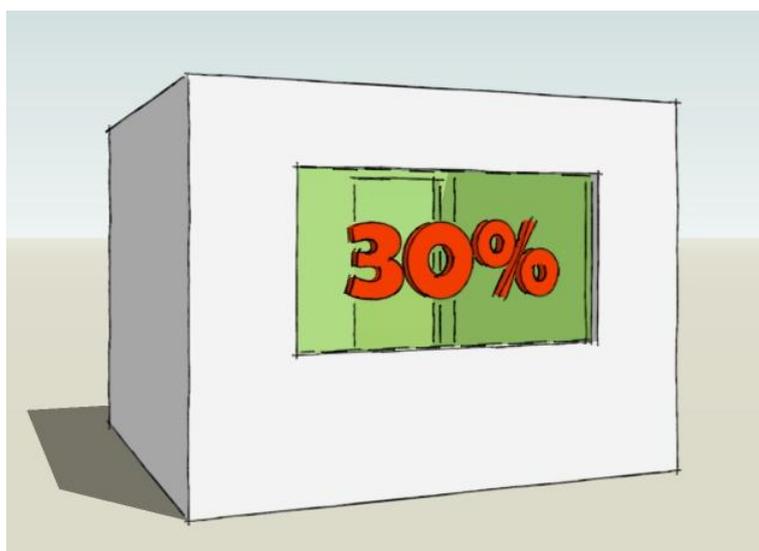
brasileiras. Reforça-se a importância de que estes critérios sejam observados de maneira associada e não isoladamente.

4.4.1 Quanto ao dimensionamento das esquadrias

Verificou-se nas simulações que os maiores valores de velocidade do ar foram obtidos nos modelos com 40% de área de abertura em relação à área de piso, o que equivaleria a 48% da área de fachada do ambiente no caso do modelo adotado neste trabalho. Entretanto, o modelo que obteve uma maior frequência de velocidades acima de 0,4m/s foi aquele com 25% de área de abertura em relação às áreas de piso, que equivale a 30% da área de fachada no caso dos quartos do modelo adotado.

Considerando que é mais viável utilizar percentuais de dimensionamento em relação à fachada dos ambientes do que do piso, recomenda-se adotar no mínimo 30% de área de abertura em relação à área de fachada dos ambientes de permanência prolongada, como quartos, salas e cozinhas, para a Zona Bioclimática oito. Este valor foi atribuído a esta Zona por ter características climáticas que fazem da ventilação natural a principal estratégia para obter conforto térmico e porque os modelos com este dimensionamento de abertura obtiveram a maior frequência de valores acima de 0,4m/s.

Figura 66 – Recomendação para ambientes de permanência prolongada na Zona Bioclimática 8: aberturas de 30% da área da fachada.

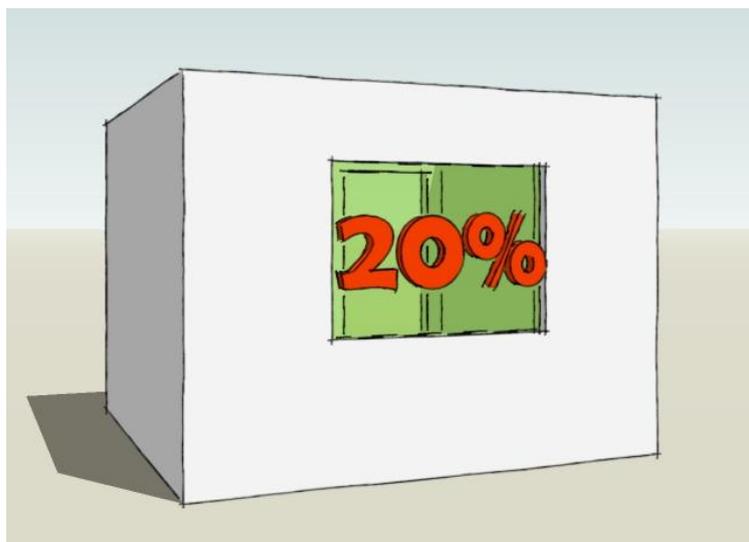


Fonte: Elaborado pela autora.

Nas demais zonas bioclimáticas recomenda-se no mínimo 20% de área de abertura em relação à área de fachada dos ambientes de permanência prolongada, desde que as esquadrias sejam passíveis de fechamento e controle por parte dos usuários. Isto porque, mesmo em

regiões de clima mais ameno, ou com grandes variações sazonais de temperatura, há estações quentes nas quais a ventilação cruzada é recomendada. Então, para que seja possível o uso da ventilação natural, capaz de promover o resfriamento fisiológico dos usuários sempre que necessário, recomenda-se este dimensionamento em ambientes de permanência prolongada. Para os dias frios ou outras situações em que, nessas cidades o vento fosse indesejável, o usuário poderia controlar o uso das esquadrias e ainda assim se sentir confortável.

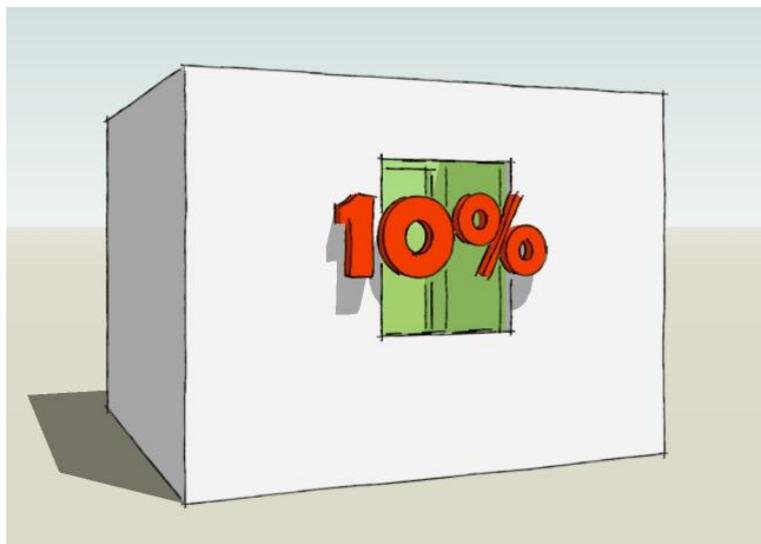
Figura 67 - Recomendação para ambientes de permanência prolongada nas Zonas Bioclimáticas de 1 a 7: aberturas de 20% da área da fachada.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para os ambientes de permanência transitória, tais como área de serviço e banheiros, recomenda-se o mínimo de 10% de área de abertura em relação à área de fachada dos ambientes em todas as zonas bioclimáticas. Este percentual equivale a um pouco mais do que os 8% em relação à área do piso, que foi simulado e em cujos casos verificou-se velocidades internas muito baixas. Considera-se que aberturas menores do que as simuladas poderiam comprometer as condições de higiene e salubridade dos ambientes a depender da incidência dos ventos e do clima da região.

Figura 68 - Recomendação para ambientes de permanência transitória nas Zonas Bioclimáticas de 1 a 8: aberturas de 10% da área da fachada.



Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 20 – Recomendações para o dimensionamento das aberturas.

Zona Bioclimática	Ambientes	Recomendação para o dimensionamento das aberturas
ZB 1 a 7	Permanência prolongada	20% da área da fachada
ZB 8	Permanência prolongada	30% da área da fachada
Todas as ZBs	Permanência Transitória	10% da área da fachada

Fonte: Elaborado pela autora.

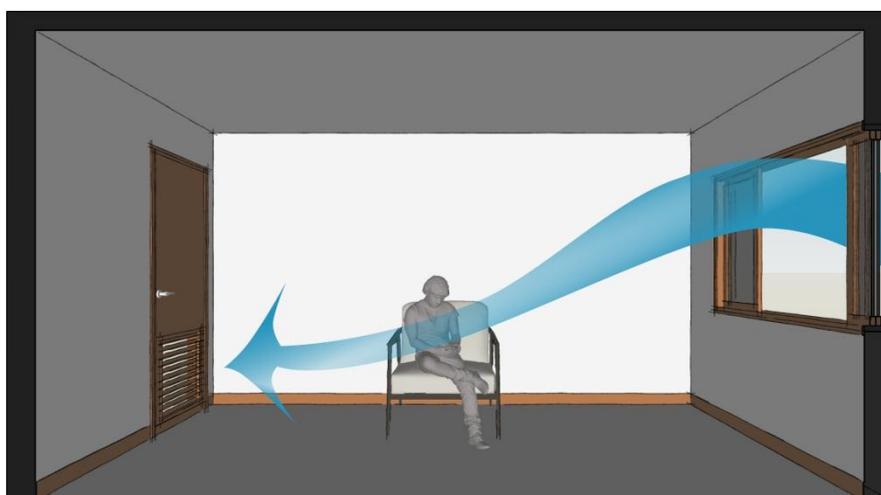
4.4.2 Quanto à ventilação cruzada

Confirmou-se neste trabalho a importância da existência de aberturas de entrada e saída para que ocorra a ventilação cruzada não só na unidade habitacional como um todo, mas principalmente no ambiente em si. As simulações considerando apenas as bandeiras das portas internas abertas tiveram velocidades abaixo de 0,4m/s em quase todos os modelos simulados exceto nos modelos com 40% de área de abertura em relação à área de piso a incidência de 90° e 135°, onde esta frequência foi de 3% e 2% respectivamente.

Sendo assim, recomenda-se o uso de dispositivos que permitam o escoamento do ar entre os ambientes tais como venezianas, seteiras e bandeiras que podem ser agregados às portas dos ambientes e que sejam passíveis de fechamento para garantir privacidade quando necessário. Esses dispositivos podem ainda favorecer a ventilação na porção mais baixa do ambiente, permitindo a passagem do vento na altura do usuário sentado ou deitado, aproximadamente 0,6m do chão.

Quando for possível, projetar mais de uma abertura no mesmo ambiente em fachadas adjacentes ou opostas será importante para permitir a ventilação cruzada; principalmente em ambientes de permanência prolongada.

Figura 69 – Ventilação cruzada sempre que possível na altura do usuário.



Fonte: Elaborado pela autora.

Além disto, verificou-se que as velocidades mais altas foram obtidas nos modelos que além de possuírem maiores aberturas, possuíam também maiores percentuais na relação entre área de aberturas de saída/área de aberturas de entrada. Os percentuais eram de 36% e 48% nos modelos com maiores áreas de aberturas, considerando a unidade habitacional. Por esta razão, recomenda-se adotar uma proporção de ventilação cruzada de no mínimo 35% em cada unidade habitacional, relacionando as aberturas de entrada e as aberturas de saída dispostas em fachadas diferentes do edifício (**Figura 70**).

Figura 70 – Aberturas em mais de uma fachada na mesma unidade habitacional podem favorecer a ventilação cruzada.



Fonte: Elaborada pela autora.

Quadro 21 – Recomendações quanto à ventilação cruzada.

Zona Bioclimática	Ambientes	Recomendação para ventilação cruzada em cada UH
Todas as ZBs	Permanência prolongada	35%

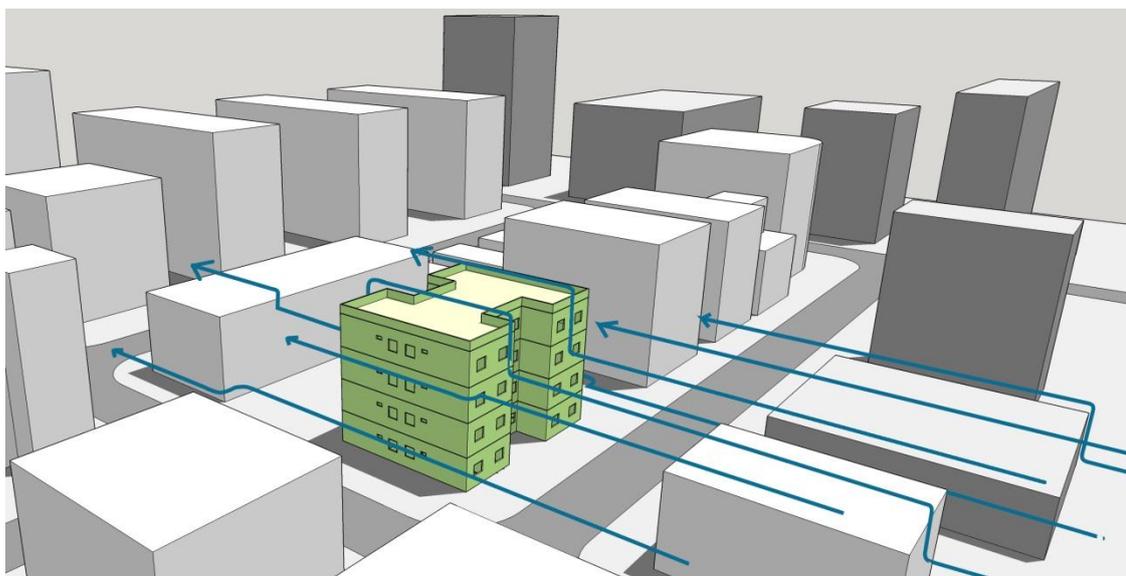
Fonte: Elaborado pela autora.

4.4.3 Quanto à incidência dos ventos

Sabe-se que as normas atuais não trazem nenhuma recomendação quanto à posição das aberturas em relação aos ventos dominantes. Entretanto, este foi um fator determinante na obtenção de maiores velocidades do ar no interior dos ambientes dos modelos simulados. Os melhores resultados tanto em termos de distribuição do ar quanto em termos de velocidade do ar, foram obtidos, conforme visto anteriormente, nos modelos com incidência de vento a 135° em relação ao eixo Y (Norte na Planta baixa da **Figura 72**). Por esta razão recomenda-se:

- Posicionar as aberturas de entrada dos ambientes de permanência prolongada para a incidência de ventos predominante na região, observando o entorno e os possíveis obstáculos que o mesmo possa proporcionar ao vento antes de atingir o edifício.

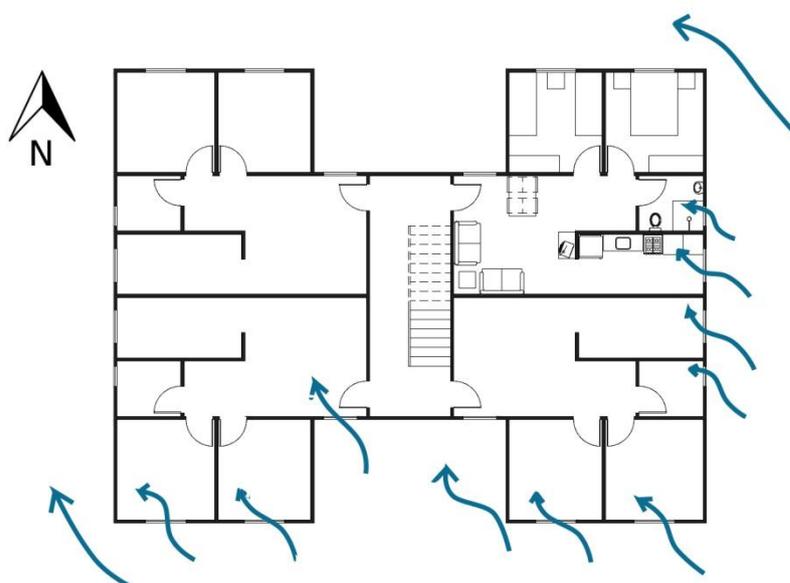
Figura 71 – A influência do entorno na ventilação natural dos edifícios em meio urbano.



Fonte: elaborado pela autora.

- Priorizar a incidência de vento a 45° , 135° , 225° e 315° sempre que possível como vento de entrada nos ambientes de permanência prolongada, principalmente nas cidades da zona Bioclimática 8 onde se recomenda a ventilação cruzada permanente.

Figura 72 – Priorizar incidências de vento inclinadas para beneficiar mais unidades habitacionais com a ventilação natural.



Fonte: Elaborado pela autora.

Quadro 22 – Recomendações em relação à incidência dos ventos predominantes.

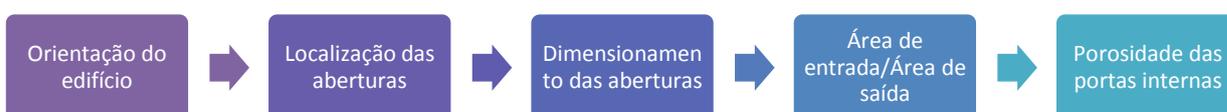
Zona Bioclimática	Ambientes	Recomendação quanto à orientação
Todas as ZBs	Permanência prolongada	Orientar as aberturas de entrada de modo a receber os ventos predominantes na região.

Fonte: Elaborado pela autora.

4.5 Avaliação da ventilação natural a partir da configuração das aberturas

A fim de garantir o desempenho adequado da ventilação natural em edificações residenciais, as diretrizes relacionadas à configuração das aberturas devem sempre ser observadas em conjunto e nunca de maneira isolada. De acordo com as considerações obtidas anteriormente nesta tese, são sugeridas as seguintes etapas para a configuração das aberturas em edificações residenciais (Figura 73 **Erro! Fonte de referência não encontrada.**):

Figura 73 – Etapas para configuração das aberturas com fins de ventilação natural em edificações residenciais.



Fonte: Elaborado pela autora.

1. Escolha da orientação do edifício. A orientação do edifício quanto aos ventos predominantes na região, é essencial para garantir uma distribuição do fluxo mais uniforme entre os ambientes e os apartamentos de um pavimento, no caso de edificações multifamiliares. A escolha da orientação deve ser feita em conjunto com a análise da orientação solar, a fim de obter um melhor desempenho térmico, satisfazendo ambas as exigências.

2. Escolha da localização das aberturas. A partir da implantação do edifício no lote e da observação do seu entorno, deve ser feito um estudo das fachadas em zonas de alta e baixa pressão e com base nestas informações definir a localização das aberturas. O leiaute interno, apesar de não ter sido abordado nas simulações, pode influenciar a distribuição do fluxo de ar e por esta razão deve ser analisado no início das decisões projetuais. Além disso, na definição da localização e tipologia das aberturas, é necessário considerar que as zonas de alta pressão corresponderão às zonas de entrada de ar e também de incidência de chuvas associadas ao vento, sendo necessária a utilização de tipologias de esquadrias que permitam o controle do usuário.

3. Dimensionamento das aberturas. Após a escolha da localização das aberturas, deve-se definir o seu tamanho de acordo com: área da fachada dos ambientes, (ver recomendações feitas no item 4.4.1), função dos ambientes (permanência transitória ou prolongada) e Zona Bioclimática onde se insere o projeto. O dimensionamento das aberturas deve prever ainda a tipologia de janela que será utilizada no projeto, garantindo a área recomendada livre para a passagem do vento, sem a obstrução causada pela esquadria. Como o dimensionamento das janelas afeta, não apenas o conforto térmico e a ventilação natural, outras demandas podem interferir na definição da área de abertura, tais como, vistas privilegiadas, luz natural e privacidade. É preciso conciliar essas demandas, buscando compensar as eventuais perdas no desempenho da ventilação natural.

4. Verificação e ajustes da relação entre áreas de abertura de entrada e saída. Após o dimensionamento das aberturas, pode-se calcular a relação entre aberturas de entrada e de saída em cada unidade habitacional. A fim de proporcionar ventilação cruzada, recomenda-se a existência de aberturas em pelo menos duas fachadas distintas da UH. De acordo com as simulações realizadas, verificou-se que maiores valores de velocidade do ar interna são encontradas quando a relação área de abertura de saída/área de abertura de entrada é maior que 35% (ver recomendações do item 4.4.2).

5. Escolha da porosidade das portas internas. Mesmo com o dimensionamento adequado das aberturas, a ventilação cruzada não vai ocorrer caso as portas internas sejam fechadas. Por isto, a fim de garantir a ventilação cruzada no ambiente mesmo nestes casos, é importante planejar a porosidade dessas portas através do uso de elementos como seteiras, bandeiras ou venezianas, conforme disposto no item 4.4.2. Esse aspecto deve ser tratado com cuidado, pois pode provocar problemas acústicos e de privacidade.

4.6 Principais resultados e contribuições

Com base na pesquisa realizada por Candido et al (2010), considerou-se 0,4m/s valor como um ponto de partida para que, a depender da temperatura operativa do ambiente a ventilação natural pudesse contribuir na sensação de conforto térmico, com maior aceitabilidade do movimento do ar por parte dos usuários. Neste sentido, os resultados de velocidade média do ar foram analisados e a frequência de valores acima de 0,4m/s foi verificada em todos os modelos.

Quanto ao dimensionamento das aberturas, como era de se esperar, as simulações mostraram que quanto maior a área de abertura, maiores os valores de velocidade do ar nos ambientes internos. Entretanto, o modelo que apresentou maior frequência de velocidades médias internas acima de 0,4m/s foi o modelo com 25% de área de abertura em relação à área do piso, 100% de porosidade das portas internas e 48% de razão entre aberturas de entrada e saída nas unidades habitacionais.

Ainda no que se refere à ventilação cruzada, ficou clara nas simulações a influência das portas internas no desempenho da ventilação natural na edificação, pois é através delas que a ventilação se desloca de um ambiente para o outro. Os valores de velocidade do ar obtidos nos modelos com 100% de porosidade das portas foram sempre superiores aos encontrados nos modelos com 25% e 15% de porosidade.

Os resultados também mostraram que o formato de planta baixa utilizado nesta pesquisa, que é comumente encontrado em cidades brasileiras, não é eficiente do ponto de vista do aproveitamento da ventilação natural, pois dependendo da incidência do vento, provoca uma distribuição desuniforme da ventilação nos apartamentos, em especial com o vento incidindo a 0° e 90° em relação ao eixo Y.

Nas simulações com o vento a 135° a distribuição do fluxo de ar foi mais uniforme, e os valores de velocidades obtidos foram mais altos, o que leva a crer que essa seja a melhor orientação a ser aproveitada do ponto de vista da ventilação natural. No entanto, é necessário conhecer a direção dos ventos predominantes no local. E esta informação nem sempre está disponível aos projetistas.

Esta pesquisa constatou também a falta de ferramentas que possam auxiliar os projetistas na tomada de decisões a fim de obter um melhor aproveitamento da ventilação natural nas edificações. Por ser um fenômeno complexo que envolve diversas variáveis, as ferramentas existentes exigem treinamento e conhecimento específico de mecânica dos

fluidos, o que na maioria das vezes não faz parte da formação dos arquitetos. Sendo assim, como um desdobramento das recomendações elaboradas nesta tese, foi desenvolvido um aplicativo para celular contendo as principais diretrizes obtidas através das simulações desta tese (descritas no item 4.4), bem como o cálculo dos percentuais de área de abertura em relação à área de fachadas dos ambientes para cada caso analisado.

Espera-se que este aplicativo possa ser utilizado por alunos de arquitetura e arquitetos, como uma fonte de informações para o projeto arquitetônico, facilitando o acesso a recomendações para configuração das aberturas a fim de possibilitar um melhor aproveitamento da ventilação natural nas edificações residenciais brasileiras. Espera-se ainda que esta ferramenta seja aprimorada com o tempo de uso e que recomendações de outras pesquisas sejam incorporadas, tornando-se útil no processo projetual de edificações residenciais com vistas à ventilação natural para fins de conforto térmico.

4.7 Considerações sobre o uso do CFD

Considera-se que o uso da ferramenta de simulação utilizada neste trabalho demonstrou-se adequada para alcançar os objetivos propostos nesta tese. Através desta ferramenta foi possível simular vinte e quatro modelos com configurações de aberturas distintas, obtendo resultados tanto quantitativos quanto qualitativos imprescindíveis para o desenvolvimento das análises.

Uma das principais vantagens do software é a de manter constantes as demais variáveis enquanto se analisa a influência de um determinado parâmetro, possibilitando a análise simultânea de diversas características, tanto da edificação quanto do entorno, que afetam o desempenho da ventilação natural.

No entanto, o uso desta ferramenta exigiu conhecimentos específicos e treinamento adequado que demandaram tempo, principalmente para alcançar a convergência dos modelos. Conforme citado no capítulo 3, diversas configurações de malha e parâmetros de relaxamento precisaram ser testadas até que se chegasse ao conjunto de tempo de simulação e precisão de resultados que se pretendia.

5 CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta contribuições para as normas brasileiras de desempenho térmico que tratam da ventilação natural e são baseadas em prescrições, no intuito de fornecer informações mais claras sobre a importância da configuração das esquadrias, em edificações residenciais multifamiliares. A análise conjunta de diversos parâmetros que afetam a ventilação natural nas edificações mostrou, de maneira geral, que as recomendações das normativas são falhas, não considerando a integração entre os diversos aspectos que influenciam o desempenho da ventilação natural nos edifícios.

Além do dimensionamento das aberturas de entrada e saída em edificações residenciais para fins de ventilação natural, esta tese ressalta a importância da porosidade das portas internas das unidades habitacionais, aspecto ausente das atuais normas vigentes no Brasil e muitas vezes desconsiderado por projetistas. Como em edificações residenciais multifamiliares existem, muitas vezes, ambientes com apenas uma janela que funciona como abertura de entrada, as portas assumem papel fundamental, pois funcionam como aberturas de saída. Uma vez que essas portas permanecem fechadas a maior parte do tempo, torna-las porosas possibilita a ventilação cruzada no ambiente mesmo quando as portas estiverem fechadas.

Outro aspecto importante no desempenho da ventilação natural é a relação entre área de aberturas de entrada e área de aberturas de saída em uma unidade habitacional. Esta relação está presente apenas no RTQ-R, que recomenda um índice de 25% conforme citado na seção 2.3.5 desta tese. Entretanto, as maiores velocidades do ar em ambientes internos foram obtidas com a associação destes dois aspectos: maiores dimensões de aberturas e maiores percentuais na relação entre área de abertura de entrada e área de aberturas de saída na unidade habitacional. Por esta razão recomenda-se o percentual mínimo de 35% que é um valor mais próximo aos simulados nesta tese, como visto na seção 4.5.2.

É importante destacar porém que é necessário considerar, de forma integrada, os diversos condicionantes arquitetônicos envolvido no projeto das aberturas: além da ventilação natural, a iluminação natural, o ruído, a incidência de chuvas, dentre outros.

5.1 Limitações do trabalho e sugestões para trabalhos futuros

Os resultados desta investigação foram obtidos através de simulações computacionais considerando um edifício residencial multifamiliar representativo dentre as tipologias

brasileiras. Vale salientar, portanto, que os resultados obtidos referem-se às edificações similares ao modelo considerado.

Além disto, o trabalho está centrado no aspecto projetual dos edifícios, e no potencial que a arquitetura possui de proporcionar condições de conforto ou desconforto, com base nas estratégias utilizadas em sua concepção. Embora se saiba que o funcionamento das edificações e mais especificamente das esquadrias depende do usuário, o aspecto comportamental não foi o foco desta tese.

O entorno foi considerado nos coeficientes de rugosidade inseridos para corrigir a velocidade do ar e no gradiente de vento. Tal consideração foi feita através do uso do gradiente de vento correspondente à situação de centro de cidade. Além disto, a maior parte das simulações foi realizada considerando o valor de 2m/s para velocidade do ar externa, que foi considerado o valor predominante dentre as médias das cidades brasileiras.

Posteriormente, foram realizadas simulações com a velocidade do ar externa de 3m/s, segundo valor mais frequente dentre as médias das capitais brasileiras, mostrando que conforme a disponibilidade de vento e velocidade do ar local, a condição de ventilação natural no interior das edificações pode se modificar.

As variações de porosidade das portas internas foram simuladas nos modelos com área de abertura mínima (8% de área de abertura em relação à área do piso) e máxima (40% de área de abertura em relação à área do piso) consideradas na pesquisa.

No que se refere à localização das aberturas, foram realizados testes de sensibilidade considerando o efeito da localização das aberturas nas paredes das fachadas a sotavento e a barlavento. No entanto, a influência desse parâmetro se mostrou pouco significativa no caso do modelo estudado. Considera-se que a localização é um aspecto muito importante e que possibilita diversas variações, sendo necessário um estudo maior de quais posições de aberturas podem surtir um maior efeito no desempenho da ventilação natural em edificações.

Com base nas limitações deste trabalho, sugere-se para trabalhos futuros os seguintes desdobramentos:

- Acrescentar ao escopo da investigação, a análise do efeito das diferentes localizações de janelas no modelo analisado, em especial nos quartos, que permitem diversas combinações de localização e leiaute.

- Investigação da influência de diferentes tipologias de janela tanto no aspecto quantitativo, mas principalmente no que se refere ao redirecionamento do escoamento da ventilação natural nos espaços internos.
- Simular as diferentes porosidades consideradas neste trabalho.
- Complementar a investigação com a análise da influência do leiaute interno no desempenho da ventilação natural com simulação de diversas configurações de mobiliário nos ambientes, buscando identificar formas de ambientação que favoreçam o aproveitamento das correntes de ar nos ambientes.
- Avaliar o efeito da ventilação natural associado à protetores solares para sombreamento das esquadrias no desempenho térmico da edificação, simulando as mesmas condições em diversas latitudes.
- Aprimorar o aplicativo desenvolvido a partir das contribuições desta tese, a fim de incorporar outras recomendações para uso da ventilação natural em edificações, facilitando o acesso às informações obtidas em pesquisas.

REFERÊNCIAS

- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15.575**. Edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013.
- ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15220**: Desempenho térmico para habitações de interesse social. Rio de Janeiro, 2005.
- AFLAKI, A. N.; MAHYUDDIN, Z.A.; AWAD, C.M. BAHARUM, M.R., A review on natural ventilation applications through building facade components and ventilation openings in tropical climates. **Energy and Buildings**. Accepted manuscript. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.04.033>>. Acesso em 01 set. 2016.
- AI; Z. T.; MAK, C. M. Determination of single-sided ventilation rates in multistory buildings: Evaluation of methods. **Energy and Buildings**. 2014, v. 69. p. 292–300.
- AKUTSU, Maria et al. Análise da ventilação natural em ambientes não condicionados. In: NUTAU: ARQUITETURA E URBANISMO: TECNOLOGIAS PARA O SÉCULO XXI, 2., 1998, São Paulo. Anais... São Paulo: USP, 1998.
- ALLOCCA, C.; CHEN, Y.; GLICKSMAN, L. R. Design analysis of single-sided natural ventilation. **Energy and Buildings**. V. 35. 785-795, 2003.
- AL-TAMIMI, N.A.M., FADZIL, S.F.S.; HARUN, W.M.W. The Effects of Orientation, Ventilation, and Varied WWR on the Thermal Performance of Residential Rooms in the Tropics. **Journal of Sustainable Development**. 2011. 4(2): p. 142-149.
- ARAÚJO, V. M. D. **Parâmetros de Conforto Térmico para usuários de Edificações Escolares no Litoral Nordestino Brasileiro**. Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996.
- ARAÚJO, M. R. de O. **Conforto térmico em salas de aula localizadas em clima quente e úmido: uma avaliação do limite inferior da zona de conforto**. Dissertação (mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2008.
- ASFOUR, O. S.; GADI, M. B. A comparison between CFD and Network models for predicting wind-driven ventilation in buildings. **Building and Environment**. V. 42. P. 4079-4085. 2007.
- ARENS, E.; TURNER, S.; ZHANG, H. and PALIAGA, G. **Moving air for comfort**. ASHRAE Journal, v. 51, n. 5, p. 18-29, 2009.
- ASHRAE Standard 55. **Thermal environmental conditions or human occupancy**, ASHRAE, Atlanta, 2004.
- AYNSLEY, R. M.; MELBOURNE, W.; VICKERY, B. J. **Architectural Aerodynamics**. Architecture Science Series. Applied Science Publishers Ltd. Londres, 1977.

BITTENCOURT, Leonardo S. **Ventilation as a Cooling Resource for Warm Humid Climates: an investigation on the influence of geometric aspects of perforated block walls to improve ventilation inside low-rise buildings.** 1993. Tese (Doutorado em Arquitetura) – Architectural Association Graduate School, Londres, 1993.

BITTENCOURT, L. S.; LÔBO, D. G. F. **A influência da localização das aberturas na ventilação natural de edificações escolares.** In: V ENCONTRO NACIONAL/ II ENCONTRO de Conforto no Ambiente Construído. Fortaleza/CE,1999.

BITTENCOURT, L. S.; PEIXOTO, L. K. O. **O efeito da forma das envazaduras arquitetônicas na ventilação de salas de aula.** In: V Encontro Nacional/ II Encontro Latino Americano de Conforto No Ambiente Construído. Fortaleza/CE,1999.

BITENCOURT, L.; LÔBO, D. G. F. A influência dos captadores de vento na ventilação natural de habitações populares localizadas em climas quentes e úmidos. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, 2003. Disponível em: <<http://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/3451>> Acesso em: 20 out. 2014.

BITTENCOURT, L. S.; CÂNDIDO, C. M. **Introdução à ventilação natural.** 3. ed. Maceió: EDUFAL, 2008.

BRAGER, G.S; DE DEAR, R.J. (1998) **Developing an adaptive model of thermal comfort and preference.** ASHRAE Trans 104 (Part 1A): 145-167.

BRASIL. Lei n. 10295, de 17 de outubro de 2001. Dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia. **Lex:** Diário Oficial da União, Brasília, 2001a. Disponível em: <www.inmetro.gov.br/qualidade/lei10295.pdf>. Acesso em: 25 de outubro de 2012.

_____. Decreto n. 4.059, de 19 de dezembro de 2001. Regulamenta a Lei no 10.295, de 17 de outubro de 2001, que dispõe sobre a Política Nacional de Conservação e Uso Racional de Energia, e dá outras providências. **Lex:** Diário Oficial da União, Brasília, 2001b. Disponível em: <www.mme.gov.br/ministerio/legislacao/decretos/Decreto%20n%204.059-2001.html>. Acesso em: 17 de setembro de 2012.

_____. Caixa Econômica Federal. **Minha Casa Minha Vida: Cartilha Completa.** Disponível em: <http://www.adh.pi.gov.br/minha_casa_minha_vida.pdf> Acesso em 22 de outubro de 2012.

_____. Ministério De Minas E Energia. **Balanco Energético Nacional 2011:** Ano base 2010/ Empresa de Pesquisa Energética. Rio de Janeiro: EPE, 2011.

_____. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria INMETRO nº 53. Aprova o Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos.** 27 de fevereiro de 2009. Disponível em:<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/detalhe.asp?seq_classe=1&seq_ato=1424>. Acesso em 29 de agosto. 2012.

_____. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial. **Portaria INMETRO nº 18. Aprova o Regulamento Técnico da Qualidade para Eficiência Energética de**

Edifícios Residenciais. 16 de janeiro de 2012. Disponível em:<<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC001788.pdf>>. Acesso em 29 de agosto.

_____. Ministério De Minas E Energia. **Balço Energético Nacional 2008:** Ano base 2007/Empresa de Pesquisa Energética. – Rio de Janeiro: EPE, 2008. 244 p.

BRE – Building Research Establishment. Principles of Natural Ventilation. **BRE Digest**, n.210. BRE, Garston, 1978.

BURNETT, J., M. BOJIĆ, AND F. YIK, Wind-induced pressure at external surfaces of a high-rise residential building in Hong Kong. **Building and Environment**, 2005. 40(6): p. 765-777.

CÂNDIDO, C. M. **Ventilação Natural e Código de Obras:** uma análise das tipologias de aberturas nos edifícios de escritório em Maceió-Al. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Alagoas. Maceió-Al, 2006.

CANDIDO C, LAMBERTS R., BITTENCOURT L., DEAR R. Aplicabilidade dos limites de velocidade do ar para efeito de conforto térmico em climas quentes e úmidos. **Revista Ambiente construído.** Porto Alegre, v.10, n.4, p.59-68, out/dez 2010.

CANDIDO, C., LAMBERTS, R. BITTENCOURT, L., DE DEAR, R. **Aceitabilidade do movimento do ar e conforto térmico em edificações naturalmente ventiladas em Maceió/AL.** In: XII Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído. **Anais...**Fortaleza, 2008.

CARLO, J. C. 2008. 215 f. **Desenvolvimento de Metodologia de Avaliação da Eficiência Energética do Envolvório de Edificações Não-residenciais.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

CHAM. Practical CFD for design engineers: From the pioneers of CFD. 2005.

CHEN, Q. Ventilation performance prediction for buildings: A method overview and recent applications. **Building and Environment**, 44(4), 848-858, 2009.

CHEN, Y.; TONG, Z.; MALKAWI, A. Investigating natural ventilation potentials across the globe: Regional and climatic variations. **Building and Environment**. 122: 386-396, 2017.

COSTA, L. C. do N. **Aproveitamento da ventilação natural nas habitações:** um estudo de casona cidade de Aracaju – SE. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2009.

CUMPLIDO NETO, R. H.; TIBIRIÇA, A.M.B.; TIBIRIÇA, A. C. G. CAMPOS, J. C. C. **Um roteiro para simulação CFD de ventilação natural por ação dos ventos em edificações.** In: XI Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. Búzios, RJ. 2011.

CUNHA, L. J. B. F. **Análise de métodos para aplicação da ventilação natural em projetos de edificações em Natal-RN**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo). Universidade federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2010.

DILKIN, P.; SCHNEIDER, P. . **Avaliação térmica das propostas de norma brasileiras para edificações de interesse social**. 2000. Disponível em: < <http://abcm.org.br/app/webroot/anais/encit/2000/arquivos/s28/s28p05.pdf> >. Acesso em: 01 jul 2017.

ELSHAFEI, G., NEGM, A., BADY, M., SUZUKI, M., IBRAHIM, M.G.. Numerical and Experimental Investigations of the Impacts of Window Parameters on Indoor Natural Ventilation in a Residential Building, **Energy and Buildings** (2017). Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.02.055>>. Acesso em 29 jun 2017.

EUA, **International Building Code**. International Code Council Inc. 2009. Disponível em:<<https://law.resource.org/pub/us/code/ibr/icc.ibr.2009.pdf>>. Acesso em: 21 abr. 2016.

FANGER, P.O. **Thermal comfort, analysis and application in environmental engineering**. New York, McGraw-Hill, 1972.

FAVAROLO, P. A., MANZ, H. Temperature-driven single sided ventilation through a large rectangular opening. **Building and Environment**. 2005; 40 (5): 689-99.

FERREIRA, F. M.. Procedimento de avaliação de conforto ambiental e eficiência energética aplicado a um caso típico da Rede Estadual de Escolas Públicas de Minas Gerais. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Arquitetura, 2006.

FIGEIREDO, C.M. **Ventilação natural em edifícios de escritórios na cidade de SP: limites e possibilidades do conforto térmico**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo: FAUUSP,2007

GAO, C.F; LEE, W.L. Evaluating the influence of openings configuration on natural ventilation performance of residential units in Hong Kong. **Buildings and Environment** 46 (2011). 961-969.

GIVONI, B. **Basic study of ventilation problems in houses in hot countries**. Israel: Building Research Station of the Institute of Technology, 1962.

GIVONI, B. **Man Climate and Architecture**. 2 ed. London, Applied Science, 1976.

GIVONI, B. **Passive and low energy cooling of buildings**. New York: John Wiley & Sons, 1992.

GLICKSMAN, L. R.; TAN, E. Application of integration multi-zone model with CFD simulation to natural ventilation prediction. **Energy and Buildings**. 37 (2005) 1049 - 1057.

- HASSAN, M. A., GUIRGUIS, N.M., SHAALAN, M. R., EL-SHAZLYN, K. M. Investigation of effects of window combinations on ventilation characteristics for thermal comfort in buildings. **Desalination** 2007; 209 (1-3); 251-60.
- HOOFF; T.V. BLOCKEN, B. CFD evaluation of natural ventilation of indoor environments by the concentration decay method: CO² gas dispersion from a semi-enclosed stadium. **Building and Environment**. v. 61. p.1-17. 2013.
- HYDE, R. **Climate Responsive Design**, E. and F. Spon, London, 2000.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Síntese de Indicadores Sociais: Uma análise das condições de vida da população brasileira 2014**, 2014. Disponível em: < <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv91983.pdf>>. Acesso em 29 jun 2017.
- JANDA, K.B. **Worldwide status of Energy Standards for Buildings: a 2007 update**. In: Proceedings of the Fifth Annual Improving Energy Efficiency in Commercial Buildings (IEECB). Frankfurt, Germany. Apr 9-10, 2008.
- KOENIGSBERGER, O.; INGERSOL, T. G.; MAYTHEW, A.; SZOKOLAY, S. V. **Manual of Tropical Housing and Building**. Part I: Climatic Design. Londres: Longman, 1974.
- KOLOKOTRONI; M.; HEISELBERG, P. **Ventilative Cooling: state of the art review**. IEA – EBC Programme – Annex 62, ISBN 87--91606--25--X, 2015.
- LABEEE, Laboratório de Eficiência Energética nas Edificações. **Arquivos climáticos**. Disponível em: < <http://www.labeee.ufsc.br/downloads/arquivos-climaticos>>. Acesso em: 16 abr. 2016.
- LAMBERTS, R.; DE DEAR, R.; CANDIDO, C. DE VECCHI, R. **Towards a Brazilian Standard on Thermal Comfort**. Research Report, 2013.
- LAMENHA, M. de A. **A escola técnica do programa Brasil profissionalizado: um projeto padrão para diferentes zonas bioclimáticas?** Dissertação (Mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2015.
- LIDDAMENT, M. W. **Air infiltration calculation techniques - an applications guide**. Bracknell, UK: AIVC. 1986
- LIN J.T., CHUAH Y.K. A study on the potential of natural ventilation and cooling for large spaces in subtropical climatic regions. **Building and Environment**.2011;v. 46:89–97.
- LOURA, R. M.; ASSIS, E. S.; BASTOS, L. E. G. **Análise comparativa entre resultados de desempenho térmico de envoltórias de edifício residencial gerados por diferentes Normas Brasileiras**. In: XI Encontro Nacional De Conforto no Ambiente Construído e VII Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Búzios, 2011.

LUKKUNAPRASIT, P, RUANGRASSAMEE, A. THANASISATHIT, N. Tsunami loading on buildings with openings. **Science of Tsunami Hazards**. 2009; 28 (5): 303-10.

MACEIÓ, PREFEITURA MUNICIPAL DE. **Código De Edificações E Urbanismo**. Lei N° 5.593, De 08 De Fevereiro De 2007. Maceió, 2007.

MCNEIL, M. A.; LETSCHERT, V.E. Future Air Conditioning Energy Consumption in Developing Countries and what can be done about it: The Potential of Efficiency in the Residential Sector. 2008. **Lawrence Berkeley National Laboratory**. Disponível em: <https://escholarship.org/uc/item/64f9r6wr#author>. Acesso em: 05 dez.2017.

MENDES, N. WESTPHAL, F. S., LAMBERTS, R. CUNHA NETO, J. A. B. Uso de instrumentos computacionais para análise do desempenho térmico e energético de edificações no Brasil In: **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 5, n. 4, p. 47-68, out./dez. 2005. ISSN 1415-8876.

MORAIS, J. M. **Ventilação natural em edifícios multifamiliares do “Programa Minha Casa Minha Vida”**. Tese (Doutorado). Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Universidade Estadual De Campinas. Campinas, 2013.

NATHERS - Nationwide House Energy Rating Scheme (NatHERS). 2017. Disponível em: < <http://www.nathers.gov.au/>> Acesso em 03 jul 2017.

NICOL, F. Adaptive thermal comfort standards in the hot–humid tropics. **Energy and Buildings**, vol. 36, 2004.

NP 1037-1, **NORMA PORTUGUESA**. Ventilação e evacuação dos produtos da combustão dos locais com aparelhos a gás. Instituto Português da Qualidade, 2002.

OLIVEIRA, M. C.A. DE. Simulação computacional para avaliação dos efeitos das modificações em casas autoconstruídas sobre a ventilação. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Campinas. Campinas-SP, 2009.

OMRANI, S.; GARCIA-HANSEN, V.; CAPRA, B.; DROGEMULLER, R. 2017 Natural ventilation in multi-storey buildings: design process and review of evaluation tools. **Building and Environment**. 2017. Accepted Manuscript.

PEREN, J. I. T. VAN HOOFF, B.C.C. LEITE, B. BLOCKEN. CFD analysis of cross-ventilation of a generic isolated building with asymmetric opening positions: Impact of roof angle and opening location. **Building and Environment**. 2015. V.85. pp.263-276.

REARDON, AUSTRALIA GOVERNMENT. **Your Home**. 2013. Disponível em: <<http://www.yourhome.gov.au/materials/embodied-energy>>. Acesso em: 10 out. 2015.

PORTUGAL, MINISTÉRIO DA ECONOMIA E DO EMPREGO. RCCTE - Regulamento das Características de Comportamento Térmico dos Edifícios. Decreto-**Lei n.º 118/2013 de 20 de agosto**. Diário da República, 1.ª série — N.º 159 — 20 de agosto de 2013.

SACRAMENTO, **A influência da dimensão da abertura de saída da cozinha/serviço no potencial de ventilação dos ambientes de edificações multifamiliares em**

Maceió-AL. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2012.

SAFE. Solutions. Softwares: PHOENICS. 2012. Disponível em:
<<http://www.safesolutions.com.br/pt/software/phoenics>> Acesso em: 12 ago. 2015.

SAHABUDDIN, M.F.M., GONZALEZ-LONGO, C. **Traditional Values and Their Adaptation in Social Housing Design: Towards A New Typology and Establishment of 'Air House' Standard in Malaysia'**, 2015, The University of Edinburgh:514 UK. Session IV - April 13, 2015.

SANTAMOURIS, M; WOUTERS, P. **Building ventilation: the state of the art.** James and James, 2006.

SANTAMOURIS, M.; KOLOKOTRONI, M. **Ventilation for Cooling.** In: SANTAMOURIS, M. (Ed.). *Advances in Passive Cooling.* London: Earthscan, 2007. p.140-189.

SAWACHI, T.; TAJIMA, M. **Trends in the Japanese building ventilation market and drivers for change.** AIVC Ventilation Information Paper.n. 25. 2008.

SORGATO, M. J.; MELO, A.P.; LAMBERTS, R. **Análise do método de simulação de desempenho térmico da norma NBR 15575.** In XII Encontro Nacional De Conforto no Ambiente Construído e VIII Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Brasília, 2013.

STAVRAKAKIS, G. M.; KOUKOU M.K.; VRACHOPOULOS M.Gr.; MARKATOS N.C. Natural cross-ventilation in buildings: Building-scale experiments, numerical simulation and thermal comfort evaluation. **Energy and Buildings.** v. 40 (2008) 1666–1681.

SUNDELL, J. **On the history of indoor air quality and health.** *Indoor Air* 2004; 14 (Suppl 7): 51–58, 2004.

TANABE, S. **Thermal comfort requirements in Japan.** Tese de Doutorado, Waseda University, 1988.

TANTASAVASDI, C., SREBIC, J., CHEN, Q. Natural ventilation design for houses in Thailand. **Energy and Buildings.** 2001; 33 (8): 815-24.

TIBIRIÇA, A. C. G.; FERRAZ, R. **Considerações para projeto de janelas em edificações: fatores ambientais, normativos e tecnológicos.** In: Encontro Nacional De Conforto no Ambiente Construído e Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Maceió, 2005.

TOFTUM, J.; ZHOU, G.; MELIKOV, A.K. Effect of airflow direction on human perception of draught, in: **Proceedings of CLIMA 2000**, August, 1997. Brussels, Belgium, paper 366.

TOFTUM, J. (2004). Air movement-good or bad? **Indoor Air** 14:40–45.

TOLEDO, A. M. **Inadequação entre geometria e desempenho, nos índices para dimensionamento de vãos e aberturas para ventilação natural, a partir da área de piso.** In: V Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e II Encontro latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Fortaleza, 1999.

TORRES, S. C.; CANDIDO, C.; BARBIRATO, G.; PASSOS, I.C.S. **Avaliação Climática de Arranjos Construtivos Urbanos: um estudo de caso em conjunto habitacional vertical de Maceió-AL.** In: Encontro Nacional De Conforto no Ambiente Construído e Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Maceió, 2005.

TRIANA, M. A.; LAMBERTS, R.; SASSI, P. Characterisation of representative building typologies for social housing projects in Brazil and its energy performance. **Energy policy.** v. 87. Pp. 524-541, 2015.

TRINDADE, S. C. PEDRINI, A. DUARTE, R. N. C. Métodos de aplicação da simulação computacional em edifícios naturalmente ventilados no clima quente e úmido. **Ambiente construído.** (Online) vol.10 no.4 Porto Alegre Oct./Dec. 2010.

VAN STRAATEN, J. F.. **Thermal Performance of Building.** Elsevier Publishing Company, Amsterdam, London, 1967.

VERDELHO, S. I. C. **Avaliação do potencial de arrefecimento de edifícios através da ventilação natural.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto, Porto, 2008.

VERSAGE, R. de S. **Ventilação natural e desempenho térmico em edifícios verticais multifamiliares em Campo Grande, MS.** Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo.2009.

VIEGAS, J. C. **Ventilação natural de edifícios de habitação.** Estudo realizado por encomenda do Instituto Nacional de Habitação. 2. Ed. Lisboa: Laboratório Nacional de Engenharia Civil. Setor de Edições do CDIT. 1996.

YIN, W., ZHANG, G., YANG, W., WANG, X. Natural ventilation potential model considering solution multiplicity, window opening percentage, air velocity and humidity in China. **Building and Environment.** 2010; 45 (2): 338-44.

OBRAS CONSULTADAS

ACRED, A.; HUNT, G. R. A simplified mathematical approach for modelling stack ventilation in multi-compartment buildings. **Building and Environment.** v. 71 (2014). p 121 – 130.

ALLARD, F.; GHIAUS, C. **Natural ventilation in the urban environment.** In: Building Ventilation: the state of the art. SANTAMOURIS, M.; WOUTERS, P. (org.) Earthscan: Londres, 2012.

AMARAL, M. A. P. da S. **Sistemas de ventilação natural e mistos em edifícios de habitação**. Dissertação (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Porto. Porto, 2008.

ANDRADE, N. C. **Estudo da ventilação natural em edificações com torres de vento multidirecionais através de ensaios em túnel de vento e simulações computacionais**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) Universidade Estadual de Campinas. Campinas-SP, 2013.

ARAÚJO, C. V. A.; PEDRINI, A. **Análise de captadores de vento para potencialização da ventilação natural**. In: XIII Encontro Nacional e IX Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. Anais...Brasília, 2013.

ARAÚJO, C. V. de A.; CUNHA, L. J. B. de F. **Proposta de método para potencializar o uso da ventilação natural**. In: XIII Encontro Nacional de Tecnologia no Ambiente Construído, Canela, 2010.

BASTOS, L. E. G.; BARROSO-KRAUSE, C.; BECK, L. **Estratégias da ventilação natural em edificações de interesse social e a norma ABNT 15220-3: zoneamento bioclimático x potencial eólico brasileiro**. In: IX Encontro Nacional e V Encontro Latino-americano de Conforto no Ambiente Construído. Anais...Ouro Preto, 2007.

BORNEHAG, C. G., SUNDELL, J., HÄGERHED-ENGMAN, L., SIGSGAARD, T. "Association between Ventilation Rates in 390 Swedish Homes and Allergic Symptoms in Children", **INDOOR AIR**: Volume 15(4) p 275-280 (2005).

BRAGER, G. S. e DE DEAR, R. **Climate, comfort and natural ventilation: A new adaptative comfort standard for ASHRAE Standard 55**. Center for the Building Environment. UC Berkeley, 2001.

CHENG, L.; MOTEZUKI, F. K. **Estudo da ventilação em ambientes de habitações utilizando índices de ventilação e lógica nebulosa**. In: X Encontro Nacional De Conforto no Ambiente Construído e VI Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído. Natal, 2009.

CÓSTOLA, D. **Ventilação por ação do vento no edifício: procedimentos para quantificação**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo – Tecnologia da Arquitetura). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

CÓSTOLA, D., ALUCCI, M. P. Aplicação de CFD para o cálculo de coeficientes de pressão externos nas aberturas de um edifício. **Revista Ambiente Construído** 11, n. 1, p. 145-158, Porto Alegre, 2011.

DERU, M., TORCELLINI, P., PLESS, S. CRAWLEY, D. **Zero Energy Buildings: A Critical Look at the Definition**. National Renewable Energy Laboratory, 2006.

DEWHA, Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts of Australia. **Energy Use in the Australian Residential Sector: 1986 – 2020**. Published by the Department of the Environment, Water, Heritage and the Arts. 2008.

ECA (European Concerted Action on, “Indoor Air Quality & its impact on man”). Formely cost Project 613. **Guidelines for Ventilation Requirements in Buildings**. Report No11. EUR 14449 EN. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 1992.

FREIXANET, V. F.; VIQUEIRA, M. R. **Cálculos básicos para estimar La ventilación cruzada en las edificaciones**. In: ENCAC/COTEC. Gramado, 2003.

JIANG Y, CHEN Q. Buoyancy-driven single-sided natural ventilation in buildings with large openings. **International Journal of Heat and Mass Transfer**;46 (6):973e88, 2003.

LEITE, R. V. **Fortaleza: terra do vento**. A influência da mudança nos padrões de ocupação do solo sobre a ventilação natural em cidade de clima tropical úmido. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo, Tecnologia da Arquitetura), Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo: FAUUSP, 2010.

LUKIANCHUKI, M. A. **Sheds extratores e captadores de ar para indução da ventilação natural em edificações**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo) Universidade de São Paulo. São Carlos, 2015.

MONTEIRO, VERÔNICA STEFANICHEN; PEZZUTO, CLÁUDIA COTRIM, MOTA, ALEXANDRE DE ASSIS, MOTA, LIA TOLEDO MOREIRA. Estudo do percentual de área de janela em edificações Brasileiras. **OCULUM ENSAIOS**16. Campinas. p.82-95. Jul. Dez. 2012.

MURAKAMI, S.; KATO, S.; OOKA, R.; SHIRAIISHI, Y. **Design of a porous-type residential building model with low environmental load in hot and humid Asia**. *Energy and Buildings* 36 (2004) 1181–1189, 2004.

PRATA, A. R. **Uma ferramenta computacional de avaliação da ventilação natural em projetos arquitetônicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas. Campinas, SP,1998.

SALES, G. de L. **Diagrama de ventilação natural: ferramenta de análise do potencial da ventilação natural no estudo preliminar de Projeto**. Tese (Doutorado). Faculdade de Arquitetura e Urbanismo. Universidade de Brasília. Brasília, 2016.

SARAIVA, Jorge Alberto Gil; SILVA, Francisco; SILVA, Fernando Vítor. Condições de ventilação natural em meio urbano recorrendo a um modelo integrado. Salvador. **Revista de Urbanismo e Arquitetura**, Salvador, v. 1, n. 9, p. 50-6, jan./jun. 2006.

SU, X., ZHANG, X., GAO, J. Evaluation method of natural ventilation system based on thermal comfort en China. **Energy and Buildings**. 41 (2009) 67-70.

TOLEDO, A. M. **Avaliação do desempenho da ventilação natural pela ação do vento em apartamentos: Uma aplicação em Maceió-AL**. Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2006.

TOLEDO, A. M. **Cr terios para o dimensionamento de aberturas de ventila o natural dos edif cios.** In: Encontro Nacional De Conforto no Ambiente Construido e Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construido. S o Pedro, 2001.

WOUTERS, P.; DELMOTTE, C.; HEIJMANS, N. **Ventilation Standards and Regulations.** In: SANTAMOURIS, M; WOUTERS, P. Building ventilation: the state of the art. James and James: London, 2006.

APÊNDICE A – Matriz de simulação.

CASO 1: Área de abertura = a 8% da Área do Piso (NBR 15.575)								
N. DO MODELO	NOME	AMBIENTE	AEV/AP	AEV/AF	VC (%)	POROSIDADE DAS PORTAS INTERNAS	INCIDÊNCIA DO VENTO	VELOCIDADE DO VENTO EXTERNO
1	MA8_P100_I0	Quarto 1 (m ²)	8%	10%	50%	100%	0	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	8%	10%		100%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	8%	21%		–		
		Banheiro (m ²)	8%	6%		100%		
2	MA8_P100_I90	Quarto 1 (m ²)	8%	10%	50%	100%	90	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	8%	10%		100%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	8%	21%		–		
		Banheiro (m ²)	8%	6%		100%		
3	MA8_P100_I135	Quarto 1 (m ²)	8%	10%	50%	100%	135	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	8%	10%		100%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	8%	21%		–		
		Banheiro (m ²)	8%	6%		100%		

4	MA8_P15_I180	Quarto 1 (m ²)	8%	10%	50%	15%	0	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	8%	10%		15%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	8%	21%		–		
		Banheiro (m ²)	8%	6%		15%		
5	MA8_P15_I90	Quarto 1 (m ²)	8%	10%	50%	15%	90	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	8%	10%		15%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	8%	21%		–		
		Banheiro (m ²)	8%	6%		15%		
6	MA8_P15_I135	Quarto 1 (m ²)	8%	10%	50%	15%	135	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	8%	10%		15%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	8%	21%		–		
		Banheiro (m ²)	8%	6%		15%		
7	MA8_P25_I180	Quarto 1 (m ²)	8%	10%	50%	25%	0	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	8%	10%		25%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	8%	21%		–		
		Banheiro (m ²)	8%	6%		25%		

8	MA8_P25_I90	Quarto 1 (m ²)	8%	10%	50%	25%	90	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	8%	10%		25%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	8%	21%		–		
		Banheiro (m ²)	8%	6%		25%		
9	MA8_P25_I135	Quarto 1 (m ²)	8%	10%	50%	25%	135	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	8%	10%		25%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	8%	21%		–		
		Banheiro (m ²)	8%	6%		25%		
CASO 2: Área de abertura = a 12% da Área do Piso (NBR 15.575)								
10	MA12_P100_I180	Quarto 1 (m ²)	12%	14%	31%	100%	0	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	12%	14%		100%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)				–		
		Banheiro (m ²)	12%	9%		100%		
11	MA12_P100_I90	Quarto 1 (m ²)	12%	14%	31%	100%	90	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	12%	14%		100%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)				–		
			12%	10%				

		Banheiro (m ²)	12%	9%		100%		
12	MA12_P100_I135	Quarto 1 (m ²)	12%	14%	31%	100%	135	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	12%	14%		100%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	12%	10%		–		
		Banheiro (m ²)	12%	9%		100%		
CASO 3: Área de abertura = a 25% da Área do Piso (NBR 15.575)								
13	MA25_P100_I180	Quarto 1 (m ²)	25%	30%	48%	100%	0	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	25%	30%		100%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	18%	26%		–		
		Banheiro (m ²)	25%	19%		100%		
14	MA25_P100_I90	Quarto 1 (m ²)	25%	30%	48%	100%	90	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	25%	30%		100%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	18%	26%		–		
		Banheiro (m ²)	25%	19%		100%		
15	MA25_P100_I135	Quarto 1 (m ²)	25%	30%	48%	100%	135	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	25%	30%		100%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	18%	26%		–		

		Banheiro (m ²)	25%	19%		100%		
CASO 4: Área de abertura máxima limitada pela fachada (próximo aos 40% da área do piso - NBR 15.220)								
16	MA40_P100_I180	Quarto 1 (m ²)	40%	48%	36%	100%	0	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	40%	48%		100%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	18%	26%		–		
		Banheiro (m ²)	32%	24%		100%		
17	MA40_P100_I90	Quarto 1 (m ²)	40%	48%	36%	100%	90	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	40%	48%		100%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	18%	26%		–		
		Banheiro (m ²)	32%	24%		100%		
18	MA40_P100_I135	Quarto 1 (m ²)	40%	48%	36%	100%	135	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	40%	48%		100%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	18%	26%		–		
		Banheiro (m ²)	32%	24%		100%		
19	MA40_P15_I180	Quarto 1 (m ²)	40%	48%	36%	15%	0	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	40%	48%		15%		

		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	18%	26%		–		
		Banheiro (m ²)	32%	24%		15%		
20	MA40_P15_I90	Quarto 1 (m ²)	40%	48%	36%	15%	90	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	40%	48%		15%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	18%	26%		–		
		Banheiro (m ²)	32%	24%		15%		
21	MA40_P15_I135	Quarto 1 (m ²)	40%	48%	36%	15%	135	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	40%	48%		15%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	18%	26%		–		
		Banheiro (m ²)	32%	24%		15%		
22	MA40_P25_I180	Quarto 1 (m ²)	40%	48%	36%	25%	0	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	40%	48%		25%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	18%	26%		–		
		Banheiro (m ²)	32%	24%		25%		
23	MA40_P25_I90	Quarto 1 (m ²)	40%	48%	36%	25%	90	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	40%	48%		25%		

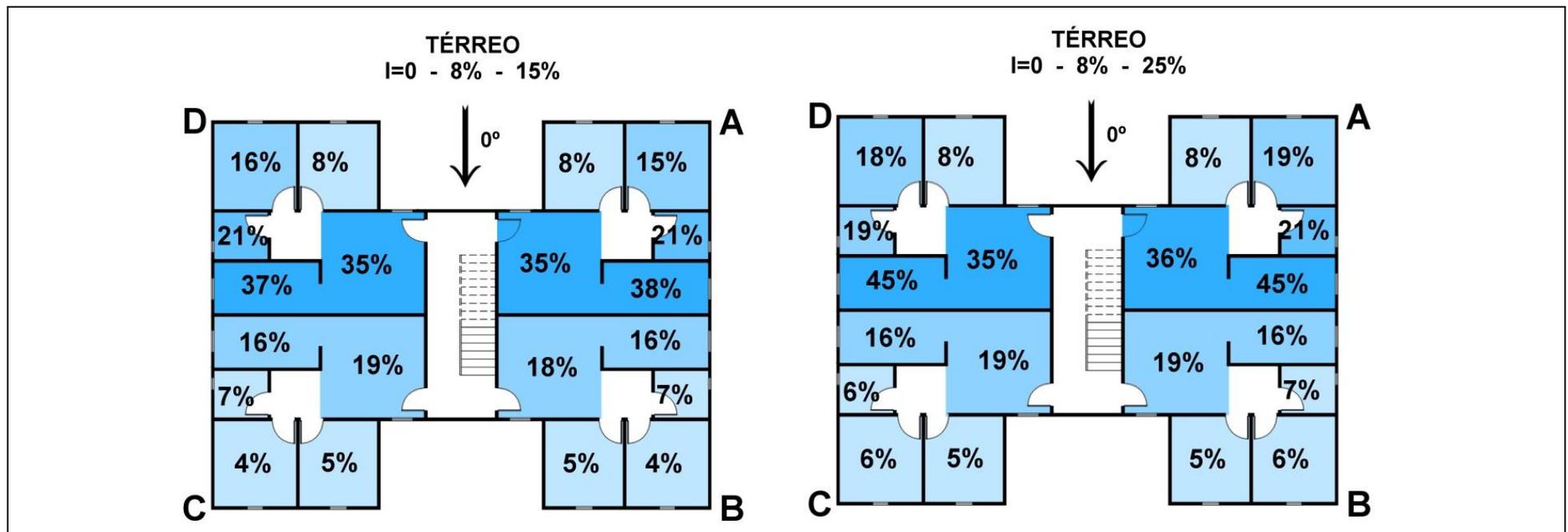
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	18%	26%		–		
		Banheiro (m ²)	32%	24%		25%		
24	MA40_P25_I135	Quarto 1 (m ²)	40%	48%	36%	25%	135	2 m/s
		Quarto 2 (m ²)	40%	48%		25%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	18%	26%		–		
		Banheiro (m ²)	32%	24%		25%		
ANÁLISE ALTERANDO VELOCIDADE DE ENTRADA PARA 3m/s								
25	MA8_P100_I0_3MS	Quarto 1 (m ²)	8%	10%	50%	100%	0	3 m/s
		Quarto 2 (m ²)	8%	10%		100%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	8%	21%		–		
		Banheiro (m ²)	8%	6%		100%		
26	MA40_P100_I135_3MS	Quarto 1 (m ²)	40%	48%	36%	100%	135	3 m/s
		Quarto 2 (m ²)	40%	48%		100%		
		Sala (m ²) + Cozinha (m ²)	18%	26%		–		
		Banheiro (m ²)	32%	24%		100%		

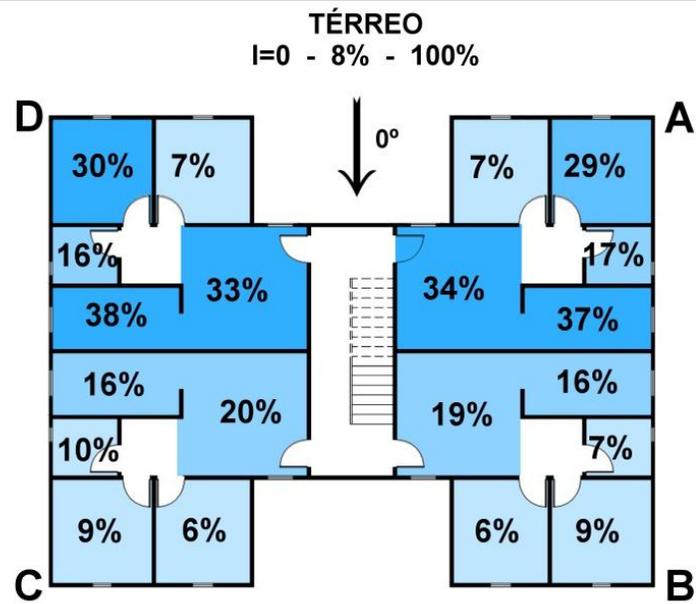
APÊNDICE B – Coeficientes de velocidade – razão entre as velocidades internas em relação às velocidades externas na mesma altura

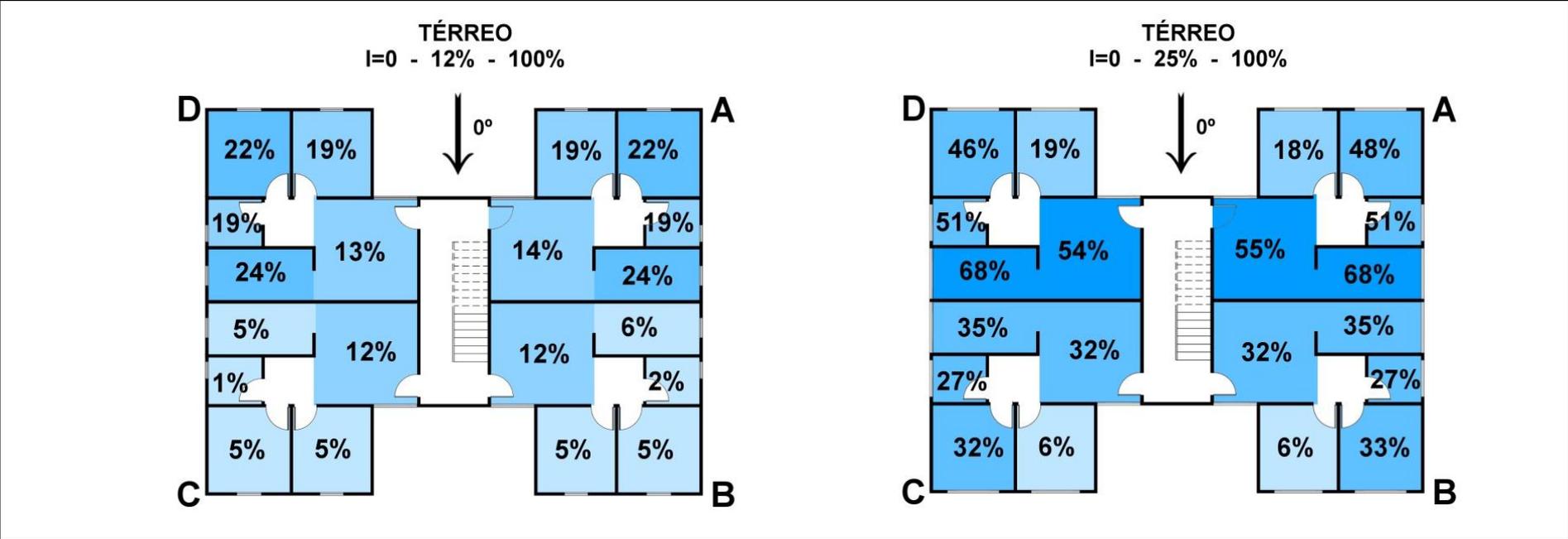
Os dados acima das figuras mostram na seguinte ordem:

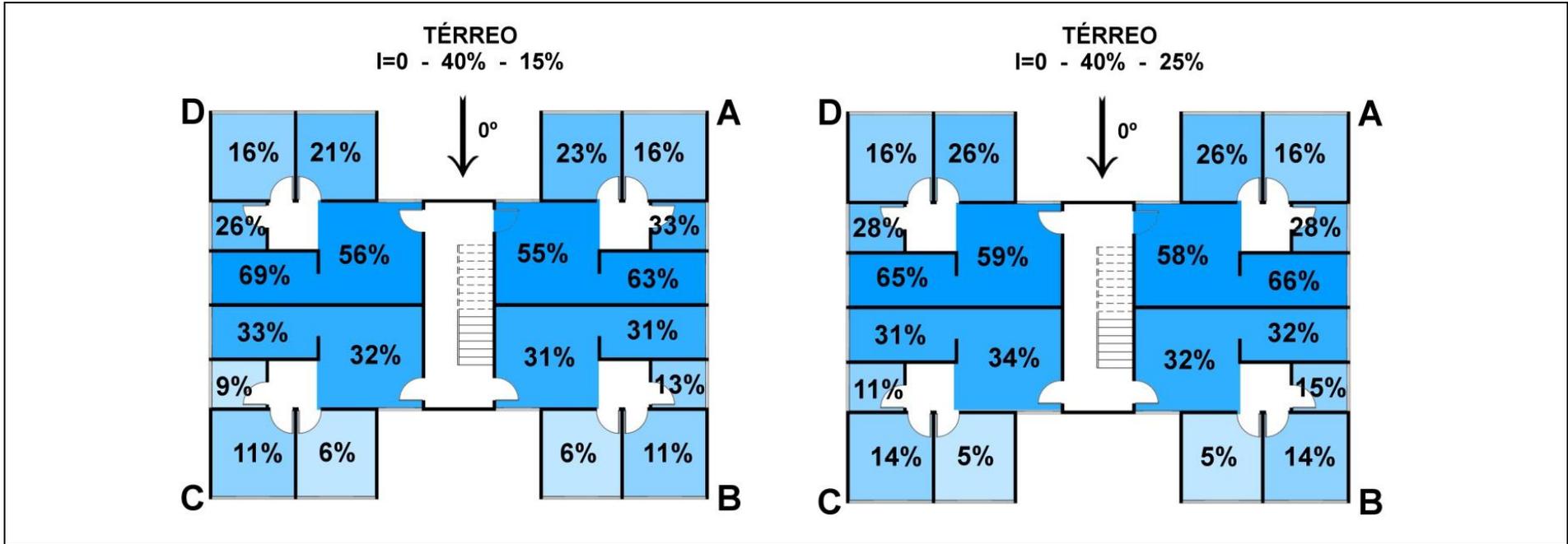
incidência dos ventos – área de abertura em relação à área de piso – porosidade das portas internas.

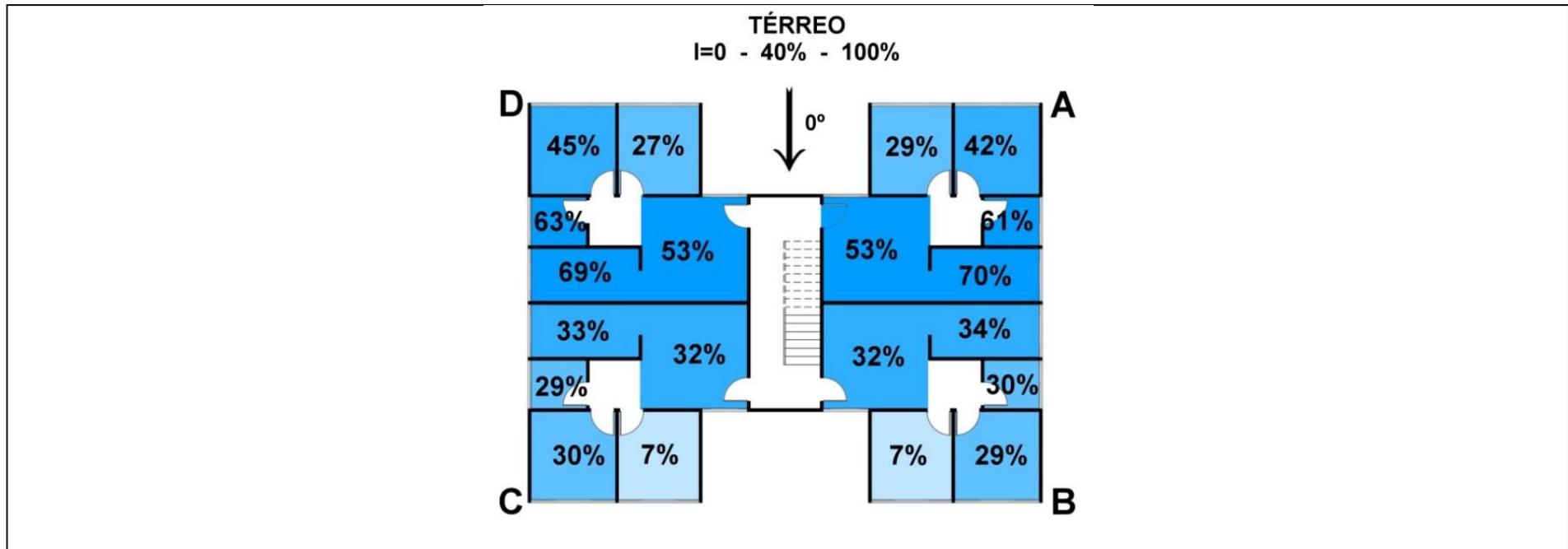
INCIDÊNCIA 0°



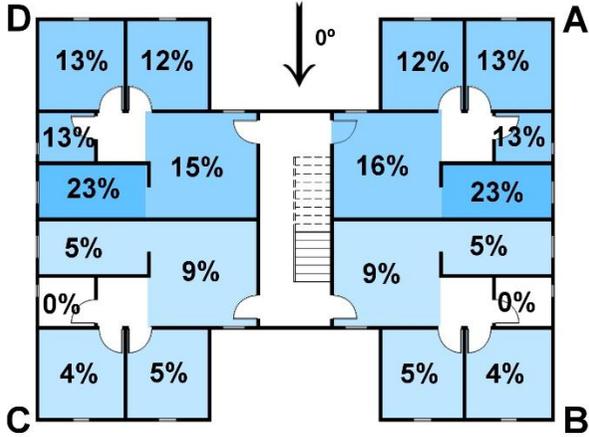




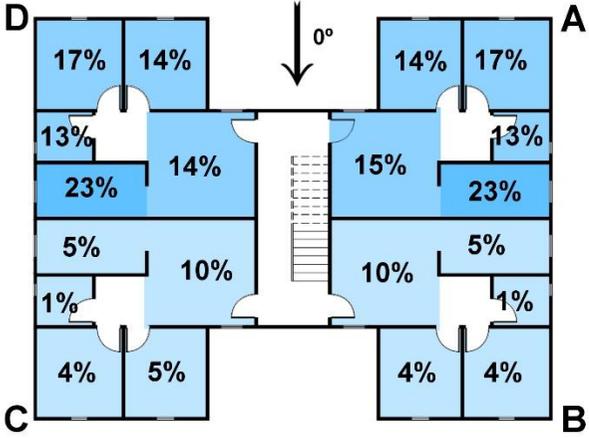




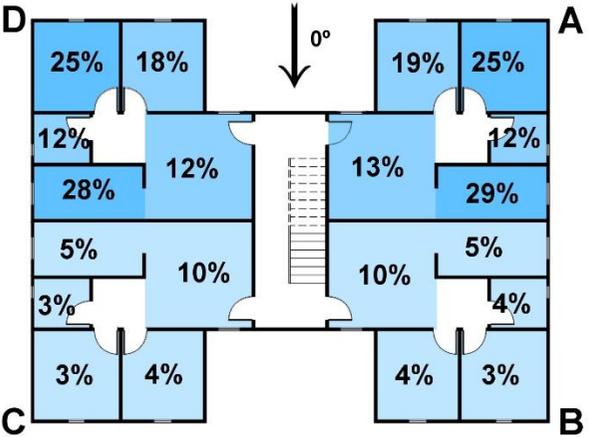
3° Pavimento
I=0 - 8% - 15%

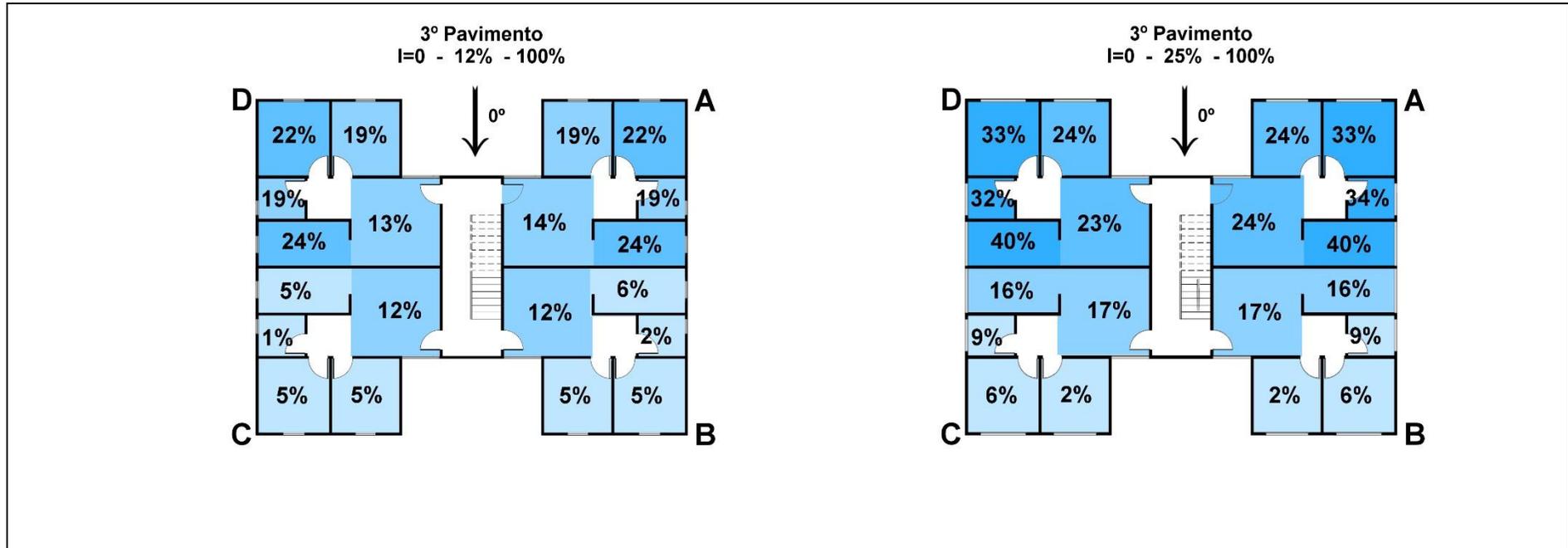


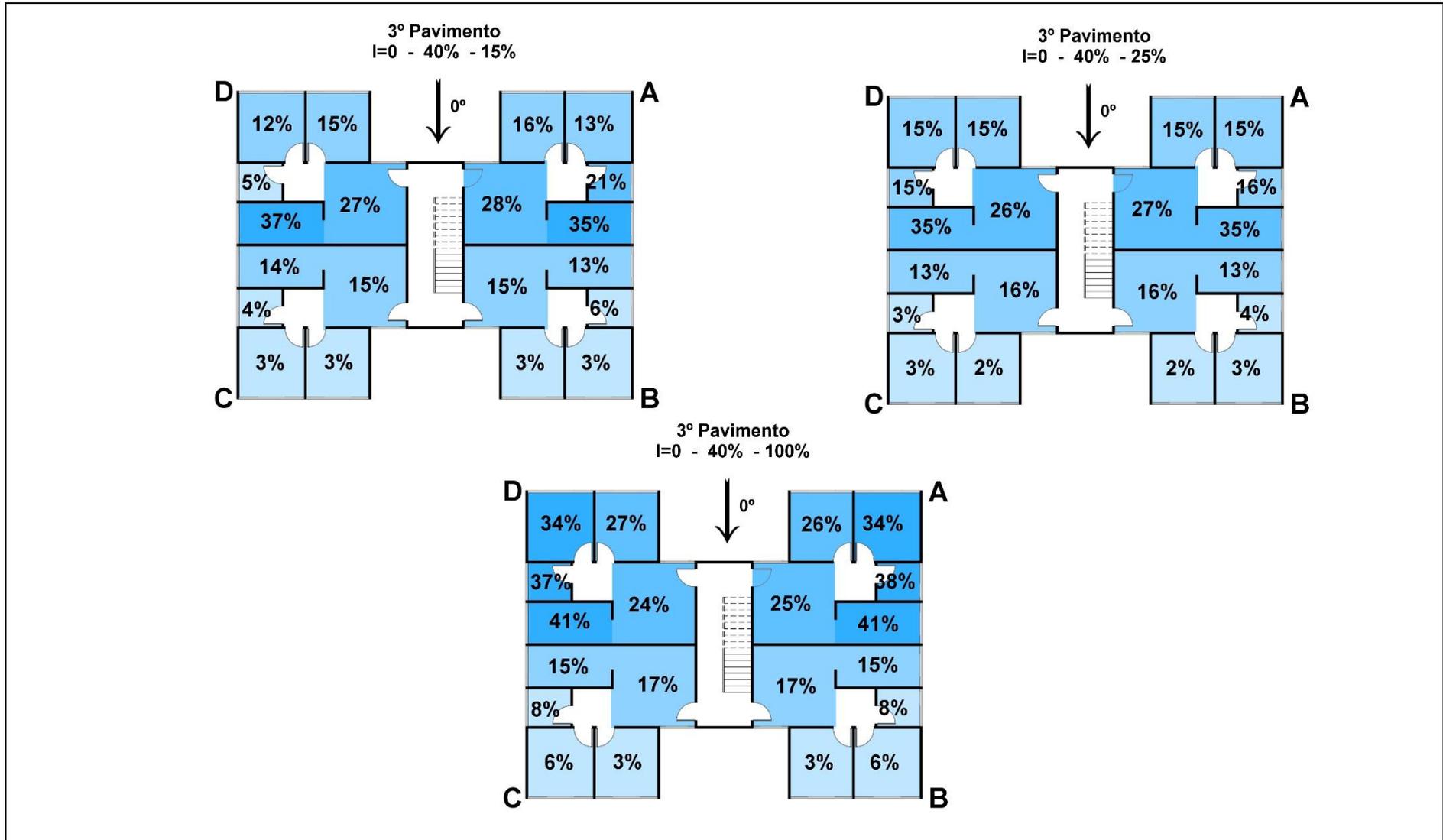
3° Pavimento
I=0 - 8% - 25%



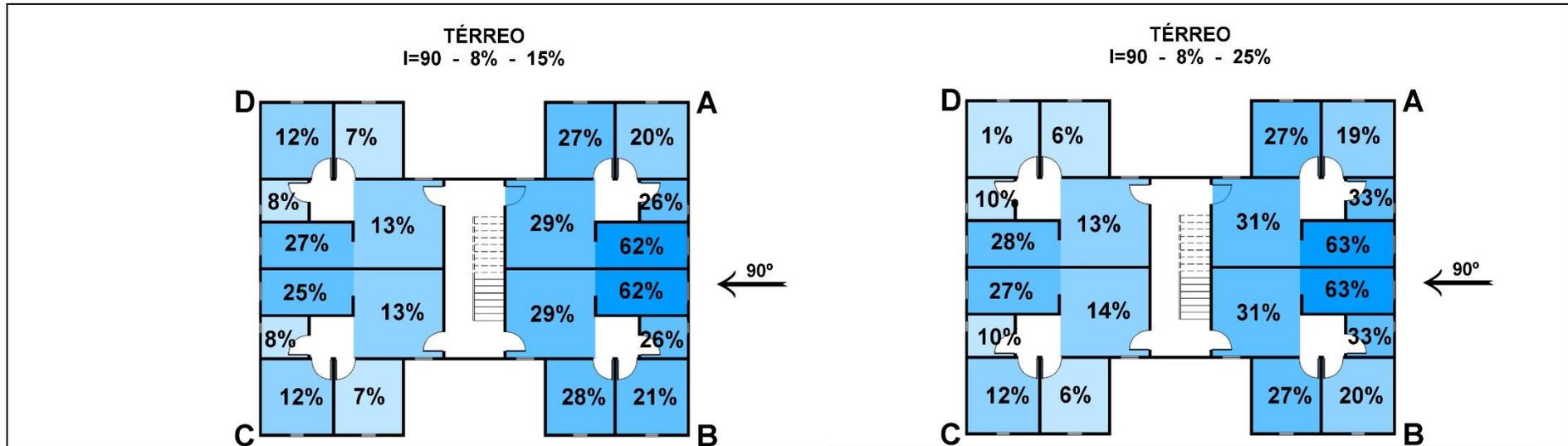
3° Pavimento
I=0 - 8% - 100%

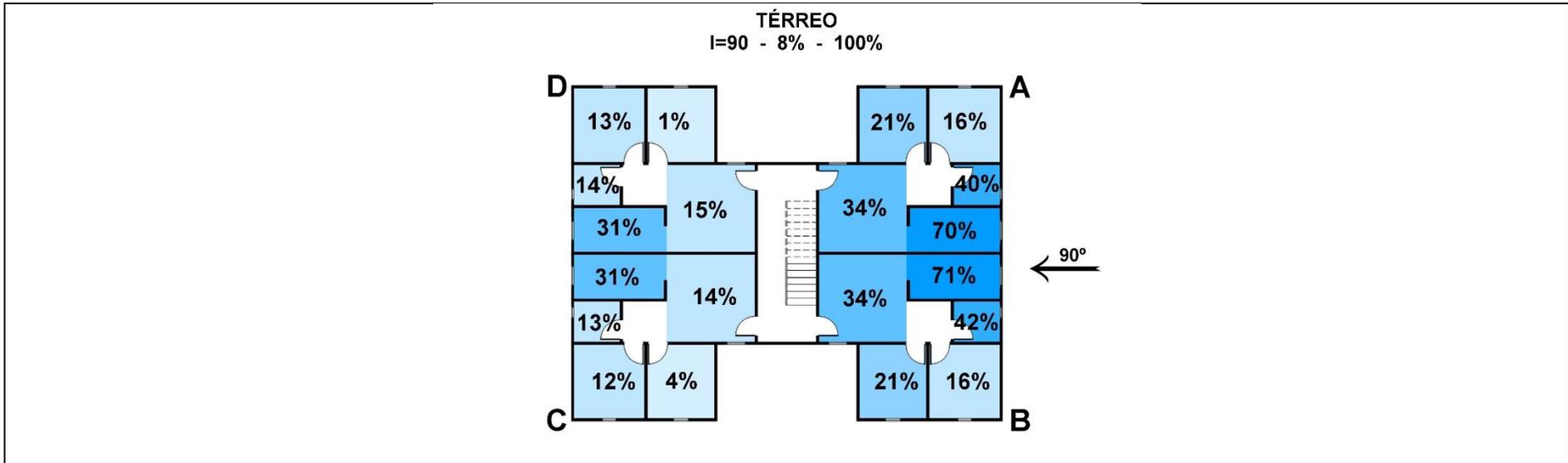


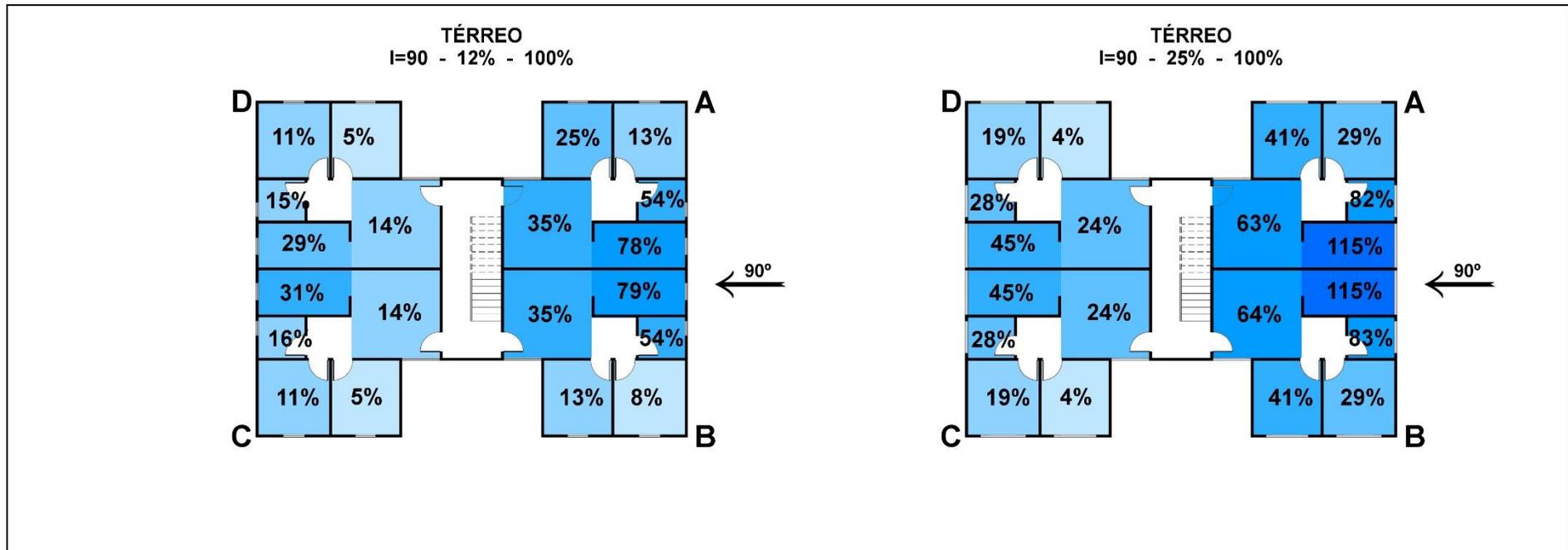


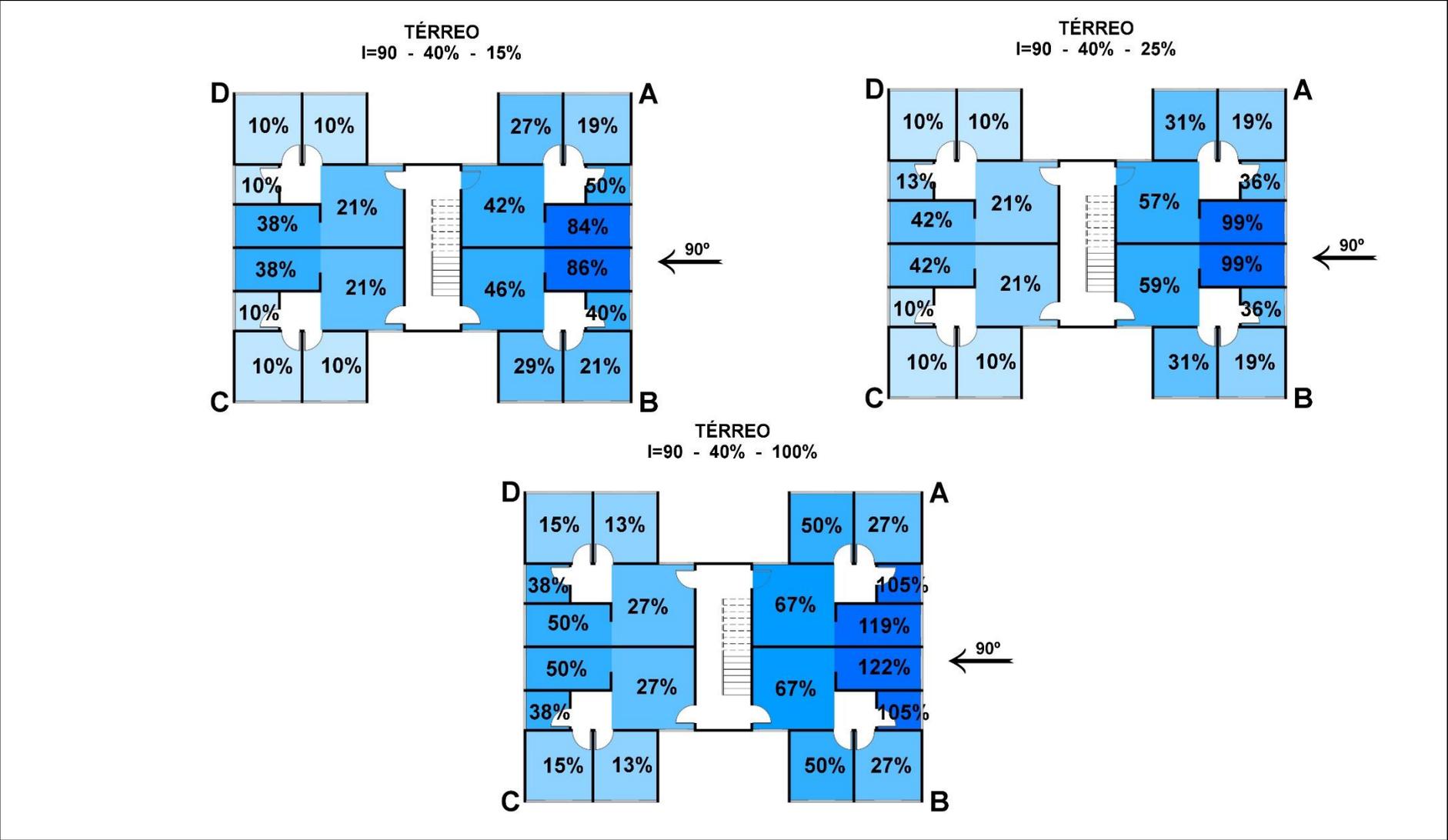


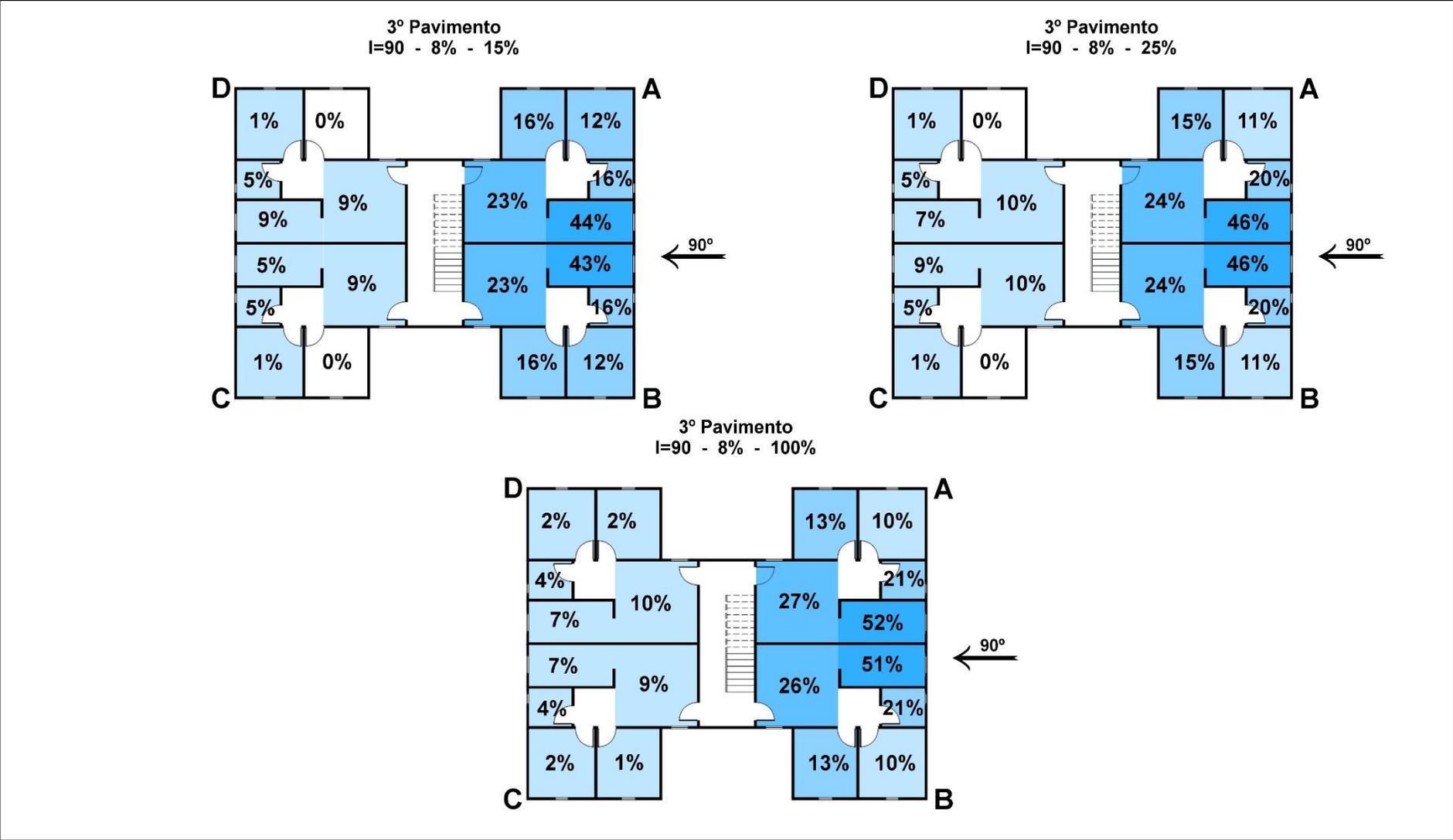
INCIDÊNCIA 90°

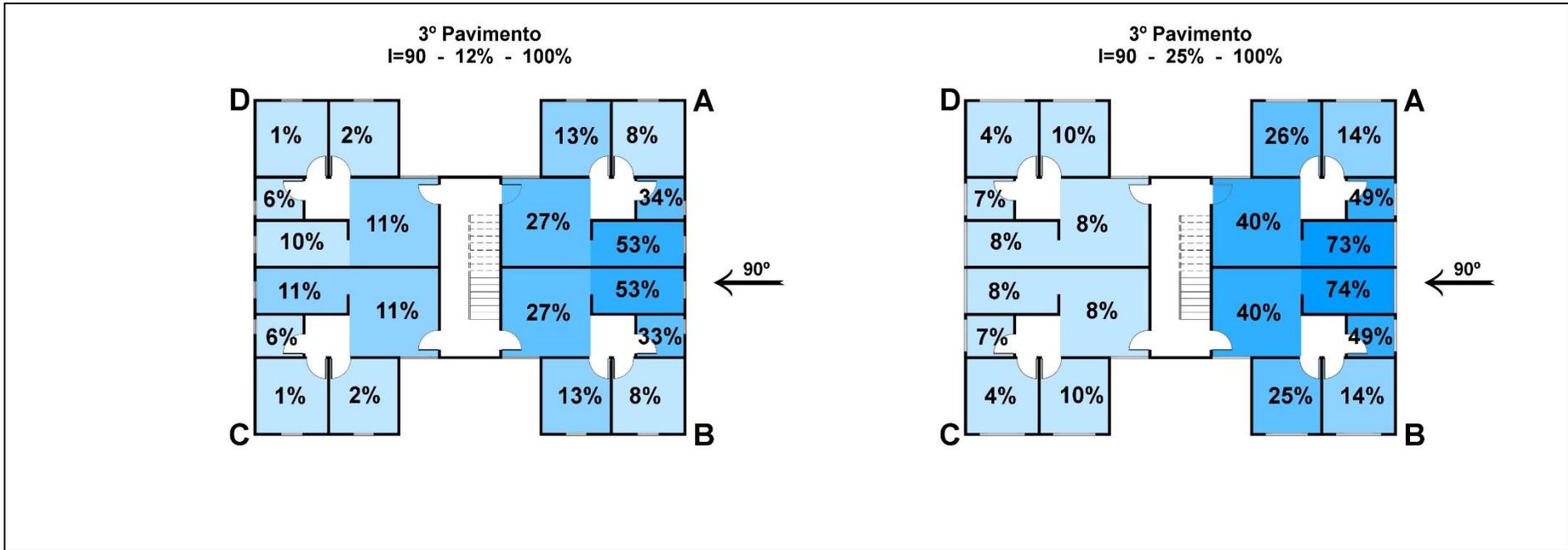




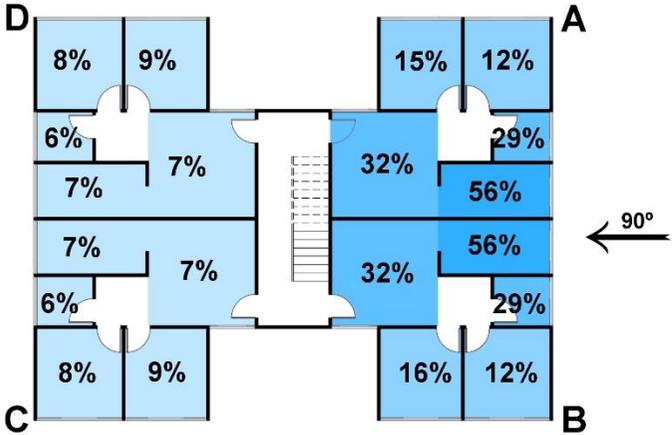




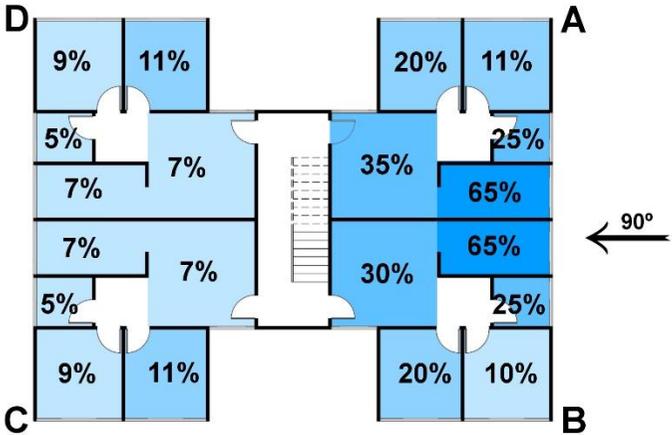




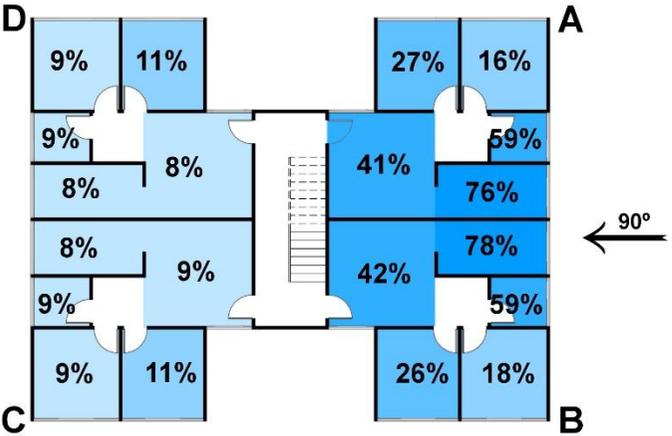
3º Pavimento
I=90 - 40% - 15%



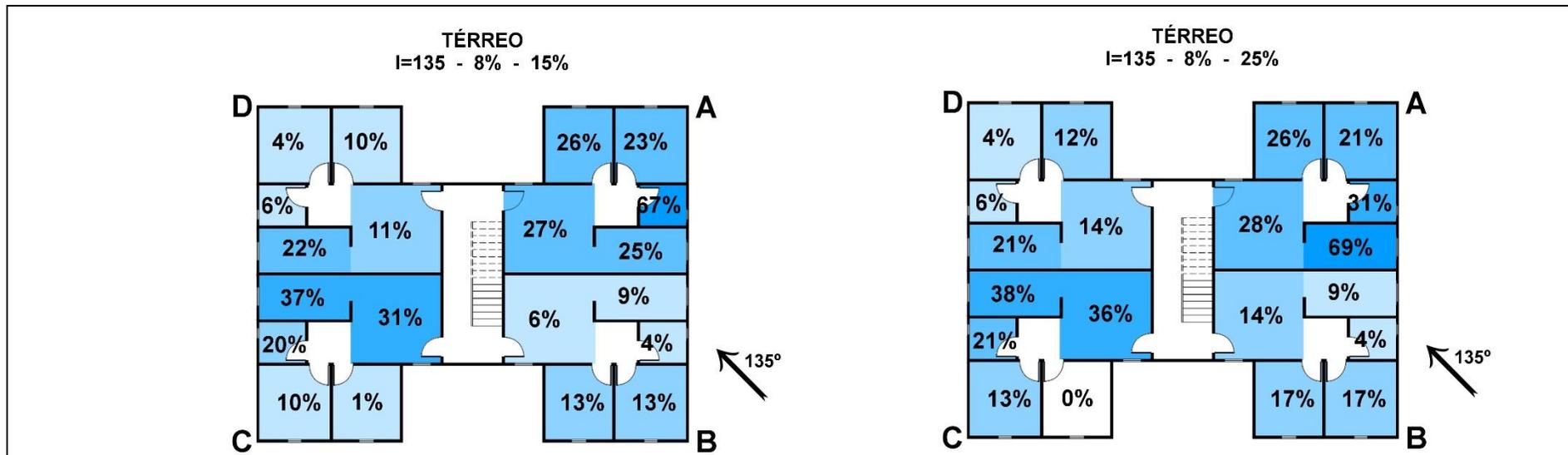
3º Pavimento
I=90 - 40% - 25%

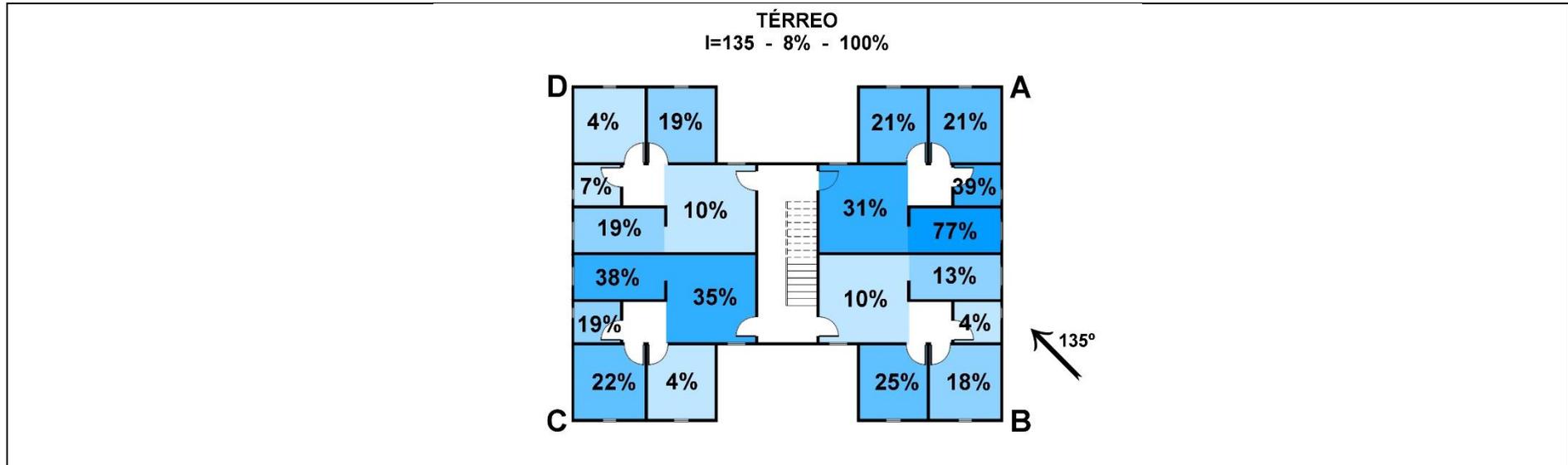


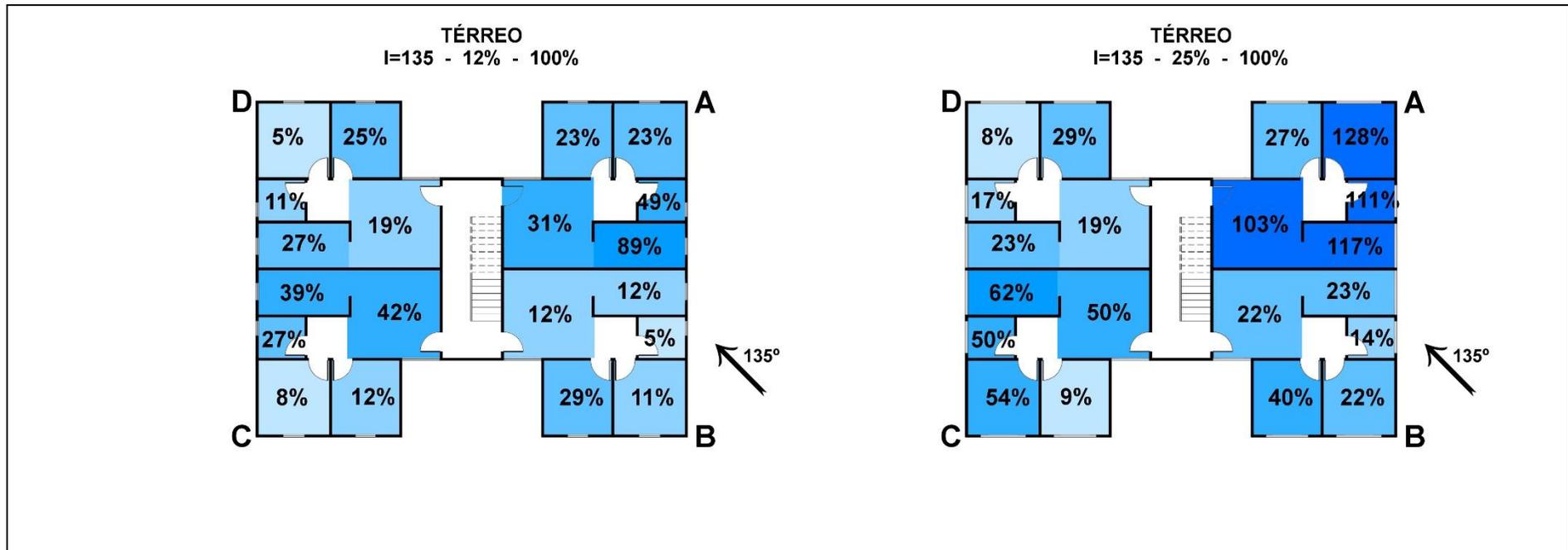
3º Pavimento
I=90 - 40% - 100%

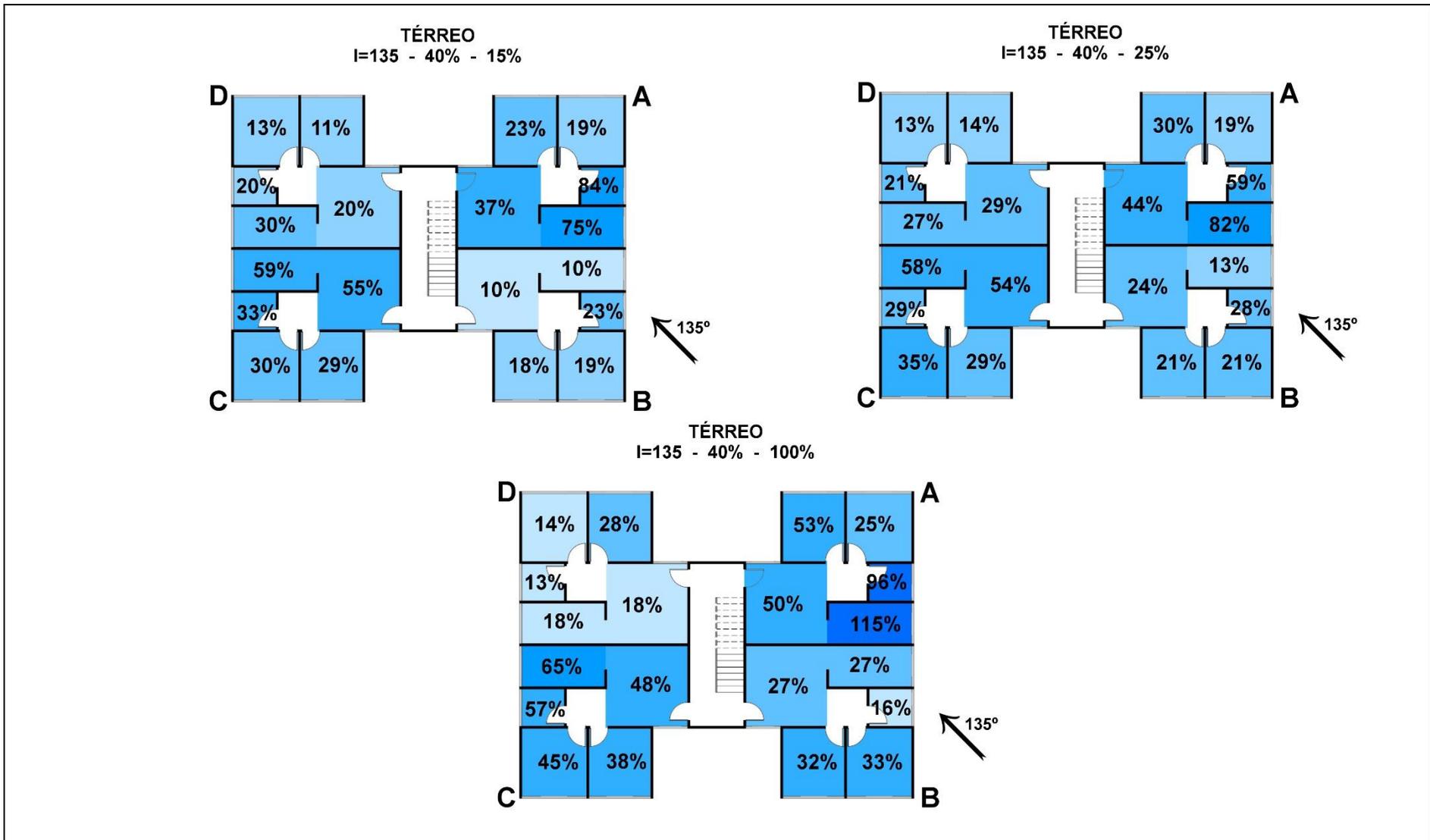


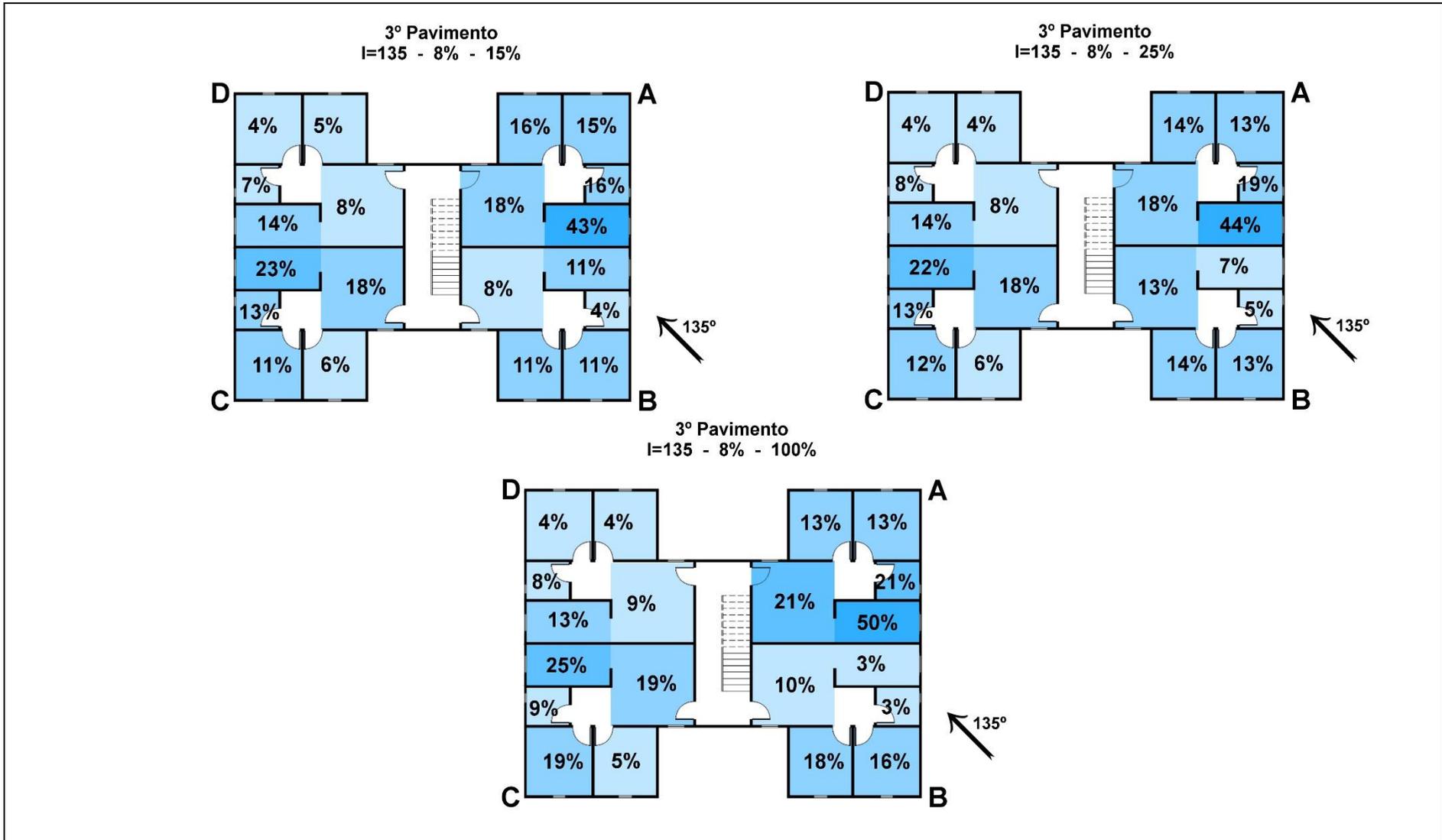
INCIDÊNCIA 135°

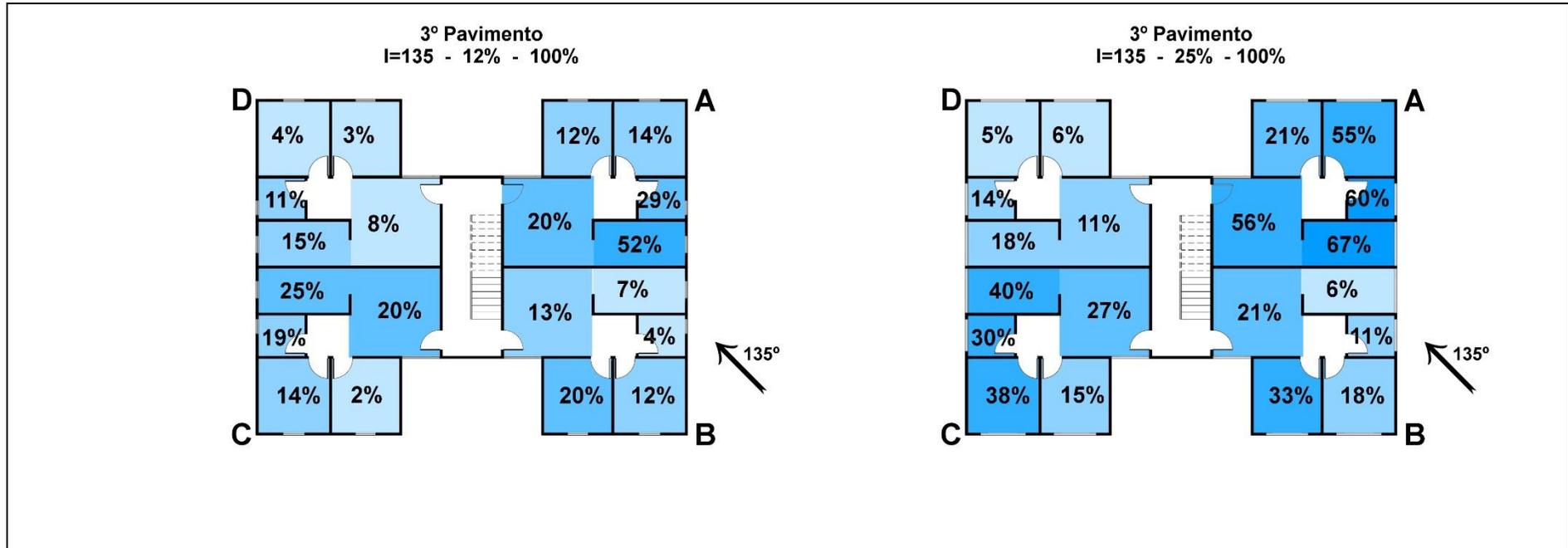


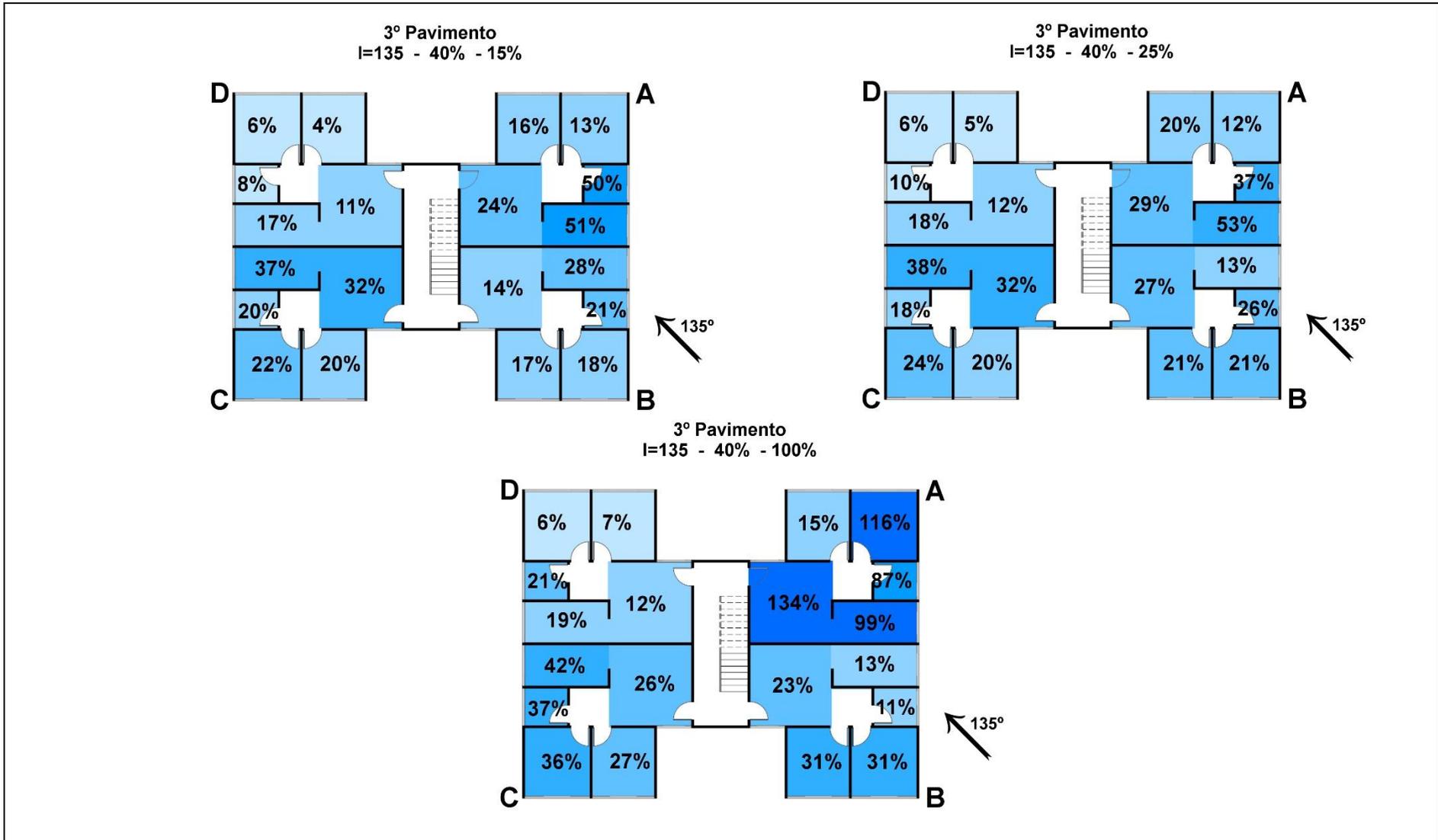












APÊNDICE C – Planilha de resultados quantitativos – velocidades do ar interna para cada caso

INCIDÊNCIA 0°																
Porosidade das portas 100%																
Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D				
Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	
8%	térreo	Sala	0,16	0,15	térreo	Sala	0,09	0,07	térreo	Sala	0,09	0,07	térreo	Sala	0,16	0,16
		Quarto 1	0,14	0,14		Quarto 1	0,05	0,03		Quarto 1	0,04	0,03		Quarto 1	0,14	0,14
		Quarto 2	0,04	0,04		Quarto 2	0,03	0,03		Quarto 2	0,03	0,03		Quarto 2	0,03	0,04
		Cozinha	0,17	0,17		Cozinha	0,07	0,08		Cozinha	0,07	0,08		Cozinha	0,18	0,17
		Banheiro	0,08	0,05		Banheiro	0,03	0,01		Banheiro	0,03	0,01		Banheiro	0,08	0,05
	3º pavimento	Sala	0,11	0,13	3º pavimento	Sala	0,08	0,07	3º pavimento	Sala	0,09	0,08	3º pavimento	Sala	0,11	0,12
		Quarto 1	0,21	0,16		Quarto 1	0,03	0,03		Quarto 1	0,03	0,03		Quarto 1	0,21	0,16
		Quarto 2	0,16	0,13		Quarto 2	0,03	0,02		Quarto 2	0,03	0,03		Quarto 2	0,16	0,13
		Cozinha	0,24	0,16		Cozinha	0,05	0,05		Cozinha	0,05	0,05		Cozinha	0,24	0,16
		Banheiro	0,10	0,06		Banheiro	0,04	0,02		Banheiro	0,03	0,01		Banheiro	0,10	0,05
Porosidade das portas 25%																
Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D				

Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m
térreo	Sala	0,17	0,18	térreo	Sala	0,09	0,07	térreo	Sala	0,09	0,06	térreo	Sala	0,17	0,17
	Quarto 1	0,09	0,10		Quarto 1	0,03	0,03		Quarto 1	0,03	0,02		Quarto 1	0,09	0,11
	Quarto 2	0,04	0,05		Quarto 2	0,03	0,03		Quarto 2	0,03	0,03		Quarto 2	0,04	0,05
	Cozinha	0,21	0,12		Cozinha	0,08	0,09		Cozinha	0,08	0,09		Cozinha	0,21	0,13
	Banheiro	0,10	0,13		Banheiro	0,04	0,05		Banheiro	0,03	0,04		Banheiro	0,09	0,13
3º pavimento	Sala	0,13	0,10	3º pavimento	Sala	0,08	0,07	3º pavimento	Sala	0,08	0,06	3º pavimento	Sala	0,12	0,09
	Quarto 1	0,14	0,12		Quarto 1	0,04	0,05		Quarto 1	0,04	0,05		Quarto 1	0,15	0,12
	Quarto 2	0,12	0,10		Quarto 2	0,04	0,05		Quarto 2	0,04	0,05		Quarto 2	0,12	0,10
	Cozinha	0,20	0,18		Cozinha	0,04	0,06		Cozinha	0,04	0,05		Cozinha	0,20	0,18
	Banheiro	0,11	0,15		Banheiro	0,01	0,00		Banheiro	0,01	0,00		Banheiro	0,11	0,14
Porosidade das portas 15%															
Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D			
Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m

	térreo	Sala	0,17	0,17	térreo	Sala	0,09	0,07	térreo	Sala	0,09	0,07	térreo	Sala	0,17	0,17
		Quarto 1	0,07	0,08		Quarto 1	0,02	0,02		Quarto 1	0,02	0,02		Quarto 1	0,08	0,08
		Quarto 2	0,04	0,05		Quarto 2	0,03	0,02		Quarto 2	0,03	0,02		Quarto 2	0,04	0,05
		Cozinha	0,18	0,17		Cozinha	0,07	0,09		Cozinha	0,07	0,09		Cozinha	0,18	0,17
		Banheiro	0,10	0,08		Banheiro	0,03	0,03		Banheiro	0,03	0,03		Banheiro	0,10	0,08
	3º pavimento	Sala	0,13	0,11	3º pavimento	Sala	0,07	0,06	3º pavimento	Sala	0,07	0,06	3º pavimento	Sala	0,13	0,10
		Quarto 1	0,11	0,10		Quarto 1	0,04	0,03		Quarto 1	0,04	0,03		Quarto 1	0,11	0,10
		Quarto 2	0,10	0,09		Quarto 2	0,04	0,04		Quarto 2	0,04	0,04		Quarto 2	0,10	0,09
		Cozinha	0,20	0,20		Cozinha	0,04	0,05		Cozinha	0,04	0,05		Cozinha	0,20	0,20
		Banheiro	0,11	0,09		Banheiro	0,00	0,00		Banheiro	0,00	0,00		Banheiro	0,11	0,08
Porosidade das portas 100%																
12 %	Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D			
	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m
	térreo	Sala	0,17	0,16	térreo	Sala	0,11	0,09	térreo	Sala	0,11	0,09	térreo	Sala	0,17	0,16
		Quarto 1	0,09	0,11		Quarto 1	0,02	0,02		Quarto 1	0,02	0,01		Quarto 1	0,09	0,11
Quarto 2	0,04	0,03	Quarto 2	0,05	0,05	Quarto 2	0,05	0,05	Quarto 2	0,04	0,03					

		Cozinha	0,22	0,18		Cozinha	0,08	0,08		Cozinha	0,08	0,08		Cozinha	0,22	0,18	
		Banheiro	0,15	0,10		Banheiro	0,05	0,03		Banheiro	0,05	0,03		Banheiro	0,14	0,10	
	3º pavimento	Sala	0,12	0,13	3º pavimento	Sala	0,11	0,09	3º pavimento	Sala	0,11	0,09	3º pavimento	Sala	0,11	0,13	
		Quarto 1	0,19	0,15		Quarto 1	0,05	0,04		Quarto 1	0,05	0,05		Quarto 1	0,19	0,15	
		Quarto 2	0,16	0,13		Quarto 2	0,04	0,04		Quarto 2	0,04	0,04		Quarto 2	0,16	0,13	
		Cozinha	0,21	0,18		Cozinha	0,05	0,05		Cozinha	0,05	0,05		Cozinha	0,21	0,18	
		Banheiro	0,16	0,10		Banheiro	0,01	0,01		Banheiro	0,01	0,00		Banheiro	0,16	0,11	
	Porosidade das portas 100%																
	25 %	Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D			
		Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m
térreo		Sala	0,26	0,24	térreo	Sala	0,15	0,10	térreo	Sala	0,15	0,10	térreo	Sala	0,26	0,23	
		Quarto 1	0,23	0,17		Quarto 1	0,16	0,09		Quarto 1	0,16	0,09		Quarto 1	0,22	0,17	
		Quarto 2	0,09	0,09		Quarto 2	0,03	0,03		Quarto 2	0,03	0,03		Quarto 2	0,09	0,09	
		Cozinha	0,32	0,30		Cozinha	0,17	0,18		Cozinha	0,17	0,18		Cozinha	0,32	0,31	
		Banheiro	0,24	0,17		Banheiro	0,13	0,08		Banheiro	0,13	0,08		Banheiro	0,24	0,18	
3º	Sala	0,21	0,22	3º	Sala	0,15	0,11	3º	Sala	0,15	0,11	3º	Sala	0,20	0,21		

	pavimento	Quarto 1	0,28	0,18	pavimento	Quarto 1	0,05	0,03	pavimento	Quarto 1	0,05	0,03	pavimento	Quarto 1	0,28	0,18
		Quarto 2	0,20	0,17		Quarto 2	0,02	0,02		Quarto 2	0,02	0,02		Quarto 2	0,20	0,18
		Cozinha	0,34	0,32		Cozinha	0,14	0,15		Cozinha	0,14	0,15		Cozinha	0,34	0,32
		Banheiro	0,28	0,21		Banheiro	0,07	0,05		Banheiro	0,07	0,05		Banheiro	0,27	0,21
Porosidade das portas 100%																
Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D				
40 %	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m
		Sala	0,25	0,23		Sala	0,15	0,10		Sala	0,15	0,10		Sala	0,25	0,23
	térreo	Quarto 1	0,20	0,16	térreo	Quarto 1	0,14	0,09	térreo	Quarto 1	0,14	0,09	térreo	Quarto 1	0,22	0,17
		Quarto 2	0,14	0,14		Quarto 2	0,03	0,03		Quarto 2	0,03	0,04		Quarto 2	0,13	0,12
		Cozinha	0,33	0,31		Cozinha	0,16	0,17		Cozinha	0,16	0,17		Cozinha	0,33	0,31
		Banheiro	0,29	0,20		Banheiro	0,14	0,09		Banheiro	0,14	0,09		Banheiro	0,30	0,20
	3º pavimento	Sala	0,21	0,22	3º pavimento	Sala	0,14	0,10	3º pavimento	Sala	0,14	0,10	3º pavimento	Sala	0,21	0,22
		Quarto 1	0,29	0,18		Quarto 1	0,05	0,03		Quarto 1	0,05	0,03		Quarto 1	0,29	0,18
		Quarto 2	0,22	0,19		Quarto 2	0,02	0,02		Quarto 2	0,02	0,02		Quarto 2	0,23	0,19
		Cozinha	0,35	0,34		Cozinha	0,13	0,14		Cozinha	0,13	0,14		Cozinha	0,35	0,34

a				a				a				a			
Banheiro		0,32	0,22	Banheiro		0,07	0,04	Banheiro		0,07	0,04	Banheiro		0,31	0,22
Porosidade das portas 25%															
Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D			
Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m
térreo	Sala	0,27	0,23	térreo	Sala	0,15	0,08	térreo	Sala	0,16	0,09	térreo	Sala	0,28	0,23
	Quarto 1	0,08	0,11		Quarto 1	0,07	0,05		Quarto 1	0,07	0,04		Quarto 1	0,07	0,11
	Quarto 2	0,12	0,12		Quarto 2	0,03	0,01		Quarto 2	0,02	0,02		Quarto 2	0,12	0,12
	Cozinha	0,31	0,28		Cozinha	0,15	0,15		Cozinha	0,15	0,15		Cozinha	0,31	0,28
	Banheiro	0,14	0,20		Banheiro	0,07	0,10		Banheiro	0,05	0,08		Banheiro	0,13	0,20
3º pavimento	Sala	0,23	0,19	3º pavimento	Sala	0,14	0,09	3º pavimento	Sala	0,13	0,09	3º pavimento	Sala	0,22	0,18
	Quarto 1	0,13	0,12		Quarto 1	0,02	0,03		Quarto 1	0,02	0,03		Quarto 1	0,13	0,12
	Quarto 2	0,13	0,12		Quarto 2	0,02	0,03		Quarto 2	0,02	0,03		Quarto 2	0,13	0,12
	Cozinha	0,30	0,29		Cozinha	0,11	0,12		Cozinha	0,11	0,11		Cozinha	0,30	0,29
	Banheiro	0,14	0,19		Banheiro	0,04	0,04		Banheiro	0,03	0,04		Banheiro	0,13	0,19
Porosidade das portas 15%															

		Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D						
		Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m			
	térreo	Sala		0,26	0,24	térreo	Sala		0,15	0,10	térreo	Sala		0,15	0,10	térreo	Sala		0,27	0,24
		Quarto 1		0,08	0,07		Quarto 1		0,05	0,04		Quarto 1		0,05	0,04		Quarto 1		0,08	0,07
		Quarto 2		0,11	0,10		Quarto 2		0,03	0,02		Quarto 2		0,03	0,02		Quarto 2		0,10	0,08
		Cozinha		0,30	0,31		Cozinha		0,15	0,16		Cozinha		0,16	0,17		Cozinha		0,33	0,33
		Banheiro		0,16	0,12		Banheiro		0,06	0,04		Banheiro		0,05	0,02		Banheiro		0,13	0,03
	3º pavimento	Sala		0,24	0,18	3º pavimento	Sala		0,13	0,09	3º pavimento	Sala		0,13	0,09	3º pavimento	Sala		0,23	0,17
		Quarto 1		0,11	0,07		Quarto 1		0,03	0,02		Quarto 1		0,03	0,02		Quarto 1		0,10	0,07
		Quarto 2		0,13	0,11		Quarto 2		0,02	0,02		Quarto 2		0,02	0,02		Quarto 2		0,12	0,10
		Cozinha		0,29	0,30		Cozinha		0,11	0,12		Cozinha		0,12	0,13		Cozinha		0,31	0,31
		Banheiro		0,18	0,13		Banheiro		0,05	0,03		Banheiro		0,03	0,02		Banheiro		0,04	0,02
Velocidade 3 m/s																				
8%	Porosidade das portas 100%																			
	Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D							

	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m
	térreo	Sala	0,24	0,23	térreo	Sala	0,14	0,11	térreo	Sala	0,14	0,11	térreo	Sala	0,24	0,23
		Quarto 1	0,05	0,06		Quarto 1	0,04	0,04		Quarto 1	0,04	0,04		Quarto 1	0,05	0,06
		Quarto 2	0,21	0,21		Quarto 2	0,07	0,05		Quarto 2	0,07	0,05		Quarto 2	0,21	0,21
		Cozinha	0,29	0,24		Cozinha	0,11	0,13		Cozinha	0,11	0,13		Cozinha	0,29	0,24
		Banheiro	0,12	0,07		Banheiro	0,05	0,02		Banheiro	0,05	0,02		Banheiro	0,12	0,07
	3º pavimento	Sala	0,17	0,19	3º pavimento	Sala	0,13	0,11	3º pavimento	Sala	0,13	0,11	3º pavimento	Sala	0,17	0,19
		Quarto 1	0,24	0,19		Quarto 1	0,05	0,04		Quarto 1	0,05	0,04		Quarto 1	0,24	0,19
		Quarto 2	0,32	0,24		Quarto 2	0,04	0,04		Quarto 2	0,04	0,04		Quarto 2	0,32	0,24
		Cozinha	0,37	0,24		Cozinha	0,07	0,08		Cozinha	0,07	0,08		Cozinha	0,37	0,24
		Banheiro	0,16	0,09		Banheiro	0,06	0,03		Banheiro	0,06	0,03		Banheiro	0,16	0,09
INCIDÊNCIA 90°																
8%	Porosidade das portas 100%															
	Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D			

Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m
térreo	Sala	0,07	0,06	térreo	Sala	0,07	0,06	térreo	Sala	0,16	0,18	térreo	Sala	0,16	0,18
	Quarto 1	0,06	0,04		Quarto 1	0,06	0,05		Quarto 1	0,08	0,08		Quarto 1	0,08	0,08
	Quarto 2	0,02	0,02		Quarto 2	0,00	0,00		Quarto 2	0,10	0,07		Quarto 2	0,10	0,08
	Cozinha	0,15	0,08		Cozinha	0,15	0,08		Cozinha	0,34	0,27		Cozinha	0,34	0,27
	Banheiro	0,06	0,04		Banheiro	0,07	0,04		Banheiro	0,19	0,11		Banheiro	0,20	0,11
3º pavimento	Sala	0,08	0,08	3º pavimento	Sala	0,08	0,09	3º pavimento	Sala	0,23	0,20	3º pavimento	Sala	0,22	0,19
	Quarto 1	0,02	0,02		Quarto 1	0,02	0,02		Quarto 1	0,09	0,07		Quarto 1	0,09	0,07
	Quarto 2	0,01	0,01		Quarto 2	0,02	0,02		Quarto 2	0,11	0,09		Quarto 2	0,11	0,10
	Cozinha	0,06	0,07		Cozinha	0,06	0,07		Cozinha	0,44	0,23		Cozinha	0,43	0,23
	Banheiro	0,03	0,02		Banheiro	0,03	0,02		Banheiro	0,18	0,12		Banheiro	0,18	0,11
Porosidade das portas 25%															
Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D			
Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m

	térreo	Sala	0,06	0,06	térreo	Sala	0,07	0,06	térreo	Sala	0,15	0,16	térreo	Sala	0,15	0,16
		Quarto 1	0,01	0,07		Quarto 1	0,06	0,07		Quarto 1	0,09	0,11		Quarto 1	0,10	0,11
		Quarto 2	0,03	0,04		Quarto 2	0,03	0,04		Quarto 2	0,13	0,16		Quarto 2	0,13	0,16
		Cozinha	0,14	0,07		Cozinha	0,13	0,07		Cozinha	0,30	0,25		Cozinha	0,30	0,25
		Banheiro	0,05	0,03		Banheiro	0,05	0,03		Banheiro	0,16	0,10		Banheiro	0,16	0,10
	3º pavimento	Sala	0,08	0,09	3º pavimento	Sala	0,09	0,09	3º pavimento	Sala	0,20	0,17	3º pavimento	Sala	0,20	0,17
		Quarto 1	0,01	0,01		Quarto 1	0,01	0,01		Quarto 1	0,10	0,12		Quarto 1	0,09	0,12
		Quarto 2	0,00	0,00		Quarto 2	0,00	0,00		Quarto 2	0,13	0,16		Quarto 2	0,13	0,16
		Cozinha	0,08	0,05		Cozinha	0,06	0,07		Cozinha	0,39	0,20		Cozinha	0,39	0,20
		Banheiro	0,04	0,06		Banheiro	0,04	0,05		Banheiro	0,17	0,10		Banheiro	0,17	0,10
Porosidade das portas 15%																
Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D				
Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	
térreo	Sala	0,06	0,05	térreo	Sala	0,06	0,05	térreo	Sala	0,14	0,14	térreo	Sala	0,14	0,14	
	Quarto 1	0,06	0,05		Quarto 1	0,06	0,05		Quarto 1	0,10	0,08		Quarto 1	0,10	0,08	
	Quarto 2	0,03	0,03		Quarto 2	0,03	0,03		Quarto 2	0,13	0,11		Quarto 2	0,13	0,11	

12 %		Cozinha	0,12	0,08		Cozinha	0,13	0,08		Cozinha	0,30	0,26		Cozinha	0,30	0,26				
		Banheiro	0,04	0,03		Banheiro	0,04	0,03		Banheiro	0,13	0,08		Banheiro	0,13	0,08				
		3º pavimento	Sala	0,07		0,08	3º pavimento	Sala		0,08	0,08	3º pavimento		Sala	0,20	0,17	3º pavimento	Sala	0,20	0,17
			Quarto 1	0,01		0,01		Quarto 1		0,01	0,01			Quarto 1	0,10	0,09		Quarto 1	0,10	0,09
			Quarto 2	0,00		0,00		Quarto 2		0,00	0,00			Quarto 2	0,14	0,12		Quarto 2	0,14	0,12
			Cozinha	0,07		0,05		Cozinha		0,07	0,05			Cozinha	0,37	0,24		Cozinha	0,37	0,24
	Banheiro	0,04	0,03	Banheiro	0,04	0,03	Banheiro	0,14	0,09	Banheiro	0,14	0,09								
	Porosidade das portas 100%																			
	Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D							
	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m				
	térreo	Sala	0,07	0,06	térreo	Sala	0,07	0,06	térreo	Sala	0,17	0,17	térreo	Sala	0,17	0,18				
		Quarto 1	0,05	0,04		Quarto 1	0,05	0,04		Quarto 1	0,06	0,07		Quarto 1	0,06	0,07				
Quarto 2		0,02	0,03	Quarto 2		0,02	0,03	Quarto 2		0,12	0,12	Quarto 2		0,12	0,12					
Cozinha		0,15	0,09	Cozinha		0,14	0,09	Cozinha		0,37	0,33	Cozinha		0,37	0,33					
Banheiro		0,07	0,05	Banheiro		0,07	0,05	Banheiro		0,26	0,17	Banheiro		0,26	0,17					
3º	Sala	0,10	0,10	3º	Sala	0,10	0,10	3º	Sala	0,23	0,20	3º	Sala	0,23	0,20					

	pavimento	Quarto 1	0,01	0,01	pavimento	Quarto 1	0,01	0,01	pavimento	Quarto 1	0,07	0,06	pavimento	Quarto 1	0,07	0,06
		Quarto 2	0,02	0,01		Quarto 2	0,02	0,01		Quarto 2	0,11	0,13		Quarto 2	0,11	0,13
		Cozinha	0,09	0,07		Cozinha	0,09	0,07		Cozinha	0,45	0,29		Cozinha	0,45	0,29
		Banheiro	0,05	0,04		Banheiro	0,05	0,04		Banheiro	0,29	0,20		Banheiro	0,28	0,19
Porosidade das portas 100%																
Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D				
25 %	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m
	térreo	Sala	0,11	0,12	térreo	Sala	0,11	0,12	térreo	Sala	0,30	0,30	térreo	Sala	0,30	0,30
		Quarto 1	0,09	0,09		Quarto 1	0,09	0,09		Quarto 1	0,14	0,13		Quarto 1	0,14	0,13
		Quarto 2	0,02	0,02		Quarto 2	0,02	0,02		Quarto 2	0,19	0,19		Quarto 2	0,19	0,19
		Cozinha	0,21	0,13		Cozinha	0,21	0,13		Cozinha	0,55	0,33		Cozinha	0,55	0,33
		Banheiro	0,13	0,07		Banheiro	0,13	0,07		Banheiro	0,39	0,23		Banheiro	0,40	0,23
	3º pavimento	Sala	0,07	0,10	3º pavimento	Sala	0,07	0,10	3º pavimento	Sala	0,34	0,33	3º pavimento	Sala	0,34	0,34
		Quarto 1	0,03	0,02		Quarto 1	0,03	0,02		Quarto 1	0,12	0,11		Quarto 1	0,12	0,11
		Quarto 2	0,09	0,08		Quarto 2	0,08	0,07		Quarto 2	0,22	0,23		Quarto 2	0,21	0,23
Cozinha		0,07	0,05	Cozinha		0,06	0,05	Cozinha		0,62	0,31	Cozinha		0,63	0,32	

	a			a			a			a					
		Banheiro	0,06		0,04	Banheiro		0,06	0,04		Banheiro	0,42	0,25	Banheiro	0,42
Porosidade das portas 100%															
Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D			
Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m
térreo	Sala	0,13	0,13	térreo	Sala	0,13	0,13	térreo	Sala	0,32	0,30	térreo	Sala	0,32	0,31
	Quarto 1	0,07	0,08		Quarto 1	0,07	0,08		Quarto 1	0,13	0,14		Quarto 1	0,13	0,14
	Quarto 2	0,06	0,07		Quarto 2	0,06	0,07		Quarto 2	0,24	0,25		Quarto 2	0,24	0,25
	Cozinha	0,24	0,14		Cozinha	0,24	0,14		Cozinha	0,57	0,34		Cozinha	0,58	0,34
	Banheiro	0,18	0,10		Banheiro	0,18	0,10		Banheiro	0,50	0,27		Banheiro	0,50	0,27
3º pavimento	Sala	0,08	0,09	3º pavimento	Sala	0,07	0,09	3º pavimento	Sala	0,35	0,35	3º pavimento	Sala	0,36	0,35
	Quarto 1	0,08	0,07		Quarto 1	0,08	0,07		Quarto 1	0,14	0,16		Quarto 1	0,15	0,17
	Quarto 2	0,09	0,08		Quarto 2	0,09	0,08		Quarto 2	0,23	0,26		Quarto 2	0,22	0,25
	Cozinha	0,07	0,05		Cozinha	0,07	0,05		Cozinha	0,65	0,34		Cozinha	0,66	0,34
	Banheiro	0,08	0,06		Banheiro	0,08	0,06		Banheiro	0,50	0,27		Banheiro	0,50	0,28
Porosidade das portas 25%															

40 %

Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D			
Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m
térreo	Sala	0,10	0,10	térreo	Sala	0,10	0,10	térreo	Sala	0,27	0,24	térreo	Sala	0,28	0,24
	Quarto 1	0,05	0,09		Quarto 1	0,05	0,09		Quarto 1	0,09	0,18		Quarto 1	0,09	0,18
	Quarto 2	0,05	0,06		Quarto 2	0,05	0,06		Quarto 2	0,15	0,21		Quarto 2	0,15	0,21
	Cozinha	0,20	0,09		Cozinha	0,20	0,09		Cozinha	0,47	0,28		Cozinha	0,47	0,28
	Banheiro	0,05	0,07		Banheiro	0,06	0,05		Banheiro	0,17	0,15		Banheiro	0,17	0,15
3º pavimento	Sala	0,06	0,08	3º pavimento	Sala	0,06	0,08	3º pavimento	Sala	0,30	0,29	3º pavimento	Sala	0,30	0,30
	Quarto 1	0,08	0,05		Quarto 1	0,08	0,06		Quarto 1	0,09	0,18		Quarto 1	0,09	0,18
	Quarto 2	0,09	0,06		Quarto 2	0,09	0,06		Quarto 2	0,17	0,25		Quarto 2	0,17	0,25
	Cozinha	0,06	0,04		Cozinha	0,06	0,04		Cozinha	0,55	0,20		Cozinha	0,55	0,20
	Banheiro	0,04	0,06		Banheiro	0,04	0,06		Banheiro	0,21	0,17		Banheiro	0,21	0,17
Porosidade das portas 15%															
Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D			

	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m
	térreo	Sala	0,10	0,10	térreo	Sala	0,10	0,10	térreo	Sala	0,20	0,22	térreo	Sala	0,22	0,30
		Quarto 1	0,05	0,04		Quarto 1	0,05	0,05		Quarto 1	0,09	0,10		Quarto 1	0,10	0,10
		Quarto 2	0,05	0,03		Quarto 2	0,05	0,03		Quarto 2	0,13	0,13		Quarto 2	0,14	0,14
		Cozinha	0,18	0,11		Cozinha	0,18	0,11		Cozinha	0,40	0,26		Cozinha	0,41	0,30
		Banheiro	0,05	0,03		Banheiro	0,05	0,03		Banheiro	0,24	0,04		Banheiro	0,19	0,05
	3º pavimento	Sala	0,06	0,07	3º pavimento	Sala	0,06	0,08	3º pavimento	Sala	0,27	0,26	3º pavimento	Sala	0,27	0,26
		Quarto 1	0,07	0,06		Quarto 1	0,07	0,06		Quarto 1	0,10	0,11		Quarto 1	0,10	0,11
		Quarto 2	0,08	0,06		Quarto 2	0,08	0,06		Quarto 2	0,13	0,13		Quarto 2	0,14	0,13
		Cozinha	0,06	0,04		Cozinha	0,06	0,04		Cozinha	0,48	0,24		Cozinha	0,48	0,23
		Banheiro	0,05	0,04		Banheiro	0,05	0,04		Banheiro	0,25	0,02		Banheiro	0,25	0,02
INCIDÊNCIA 135°																
8%	Porosidade das portas 100%															
	Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D			

Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m
térreo	Sala	0,15	0,15	térreo	Sala	0,05	0,04	térreo	Sala	0,17	0,17	térreo	Sala	0,05	0,04
	Quarto 1	0,10	0,08		Quarto 1	0,09	0,07		Quarto 1	0,11	0,09		Quarto 1	0,02	0,02
	Quarto 2	0,10	0,08		Quarto 2	0,12	0,09		Quarto 2	0,02	0,01		Quarto 2	0,09	0,07
	Cozinha	0,37	0,24		Cozinha	0,06	0,05		Cozinha	0,18	0,13		Cozinha	0,09	0,05
	Banheiro	0,19	0,11		Banheiro	0,02	0,02		Banheiro	0,09	0,05		Banheiro	0,03	0,02
3º pavimento	Sala	0,18	0,16	3º pavimento	Sala	0,08	0,08	3º pavimento	Sala	0,16	0,11	3º pavimento	Sala	0,07	0,06
	Quarto 1	0,11	0,09		Quarto 1	0,14	0,11		Quarto 1	0,16	0,13		Quarto 1	0,03	0,02
	Quarto 2	0,11	0,10		Quarto 2	0,15	0,12		Quarto 2	0,04	0,04		Quarto 2	0,03	0,02
	Cozinha	0,43	0,24		Cozinha	0,03	0,01		Cozinha	0,21	0,20		Cozinha	0,11	0,07
	Banheiro	0,18	0,11		Banheiro	0,02	0,03		Banheiro	0,08	0,05		Banheiro	0,07	0,05
Porosidade das portas 25%															
Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D			
Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m

	térreo	Sala	0,13	0,13	térreo	Sala	0,07	0,06	térreo	Sala	0,17	0,19	térreo	Sala	0,07	0,05
		Quarto 1	0,10	0,13		Quarto 1	0,08	0,07		Quarto 1	0,06	0,07		Quarto 1	0,02	0,02
		Quarto 2	0,12	0,15		Quarto 2	0,08	0,09		Quarto 2	0,00	0,00		Quarto 2	0,06	0,05
		Cozinha	0,33	0,20		Cozinha	0,05	0,06		Cozinha	0,18	0,11		Cozinha	0,10	0,06
		Banheiro	0,15	0,09		Banheiro	0,02	0,02		Banheiro	0,10	0,13		Banheiro	0,03	0,02
	3º pavimento	Sala	0,16	0,15	3º pavimento	Sala	0,11	0,08	3º pavimento	Sala	0,15	0,12	3º pavimento	Sala	0,07	0,06
		Quarto 1	0,11	0,16		Quarto 1	0,11	0,08		Quarto 1	0,10	0,09		Quarto 1	0,03	0,05
		Quarto 2	0,12	0,15		Quarto 2	0,11	0,09		Quarto 2	0,05	0,05		Quarto 2	0,04	0,04
		Cozinha	0,38	0,20		Cozinha	0,06	0,06		Cozinha	0,19	0,19		Cozinha	0,12	0,07
		Banheiro	0,16	0,10		Banheiro	0,04	0,02		Banheiro	0,11	0,15		Banheiro	0,07	0,04
Porosidade das portas 15%																
Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D				
Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	
térreo	Sala	0,13	0,12	térreo	Sala	0,03	0,04	térreo	Sala	0,15	0,15	térreo	Sala	0,05	0,05	
	Quarto 1	0,11	0,09		Quarto 1	0,06	0,05		Quarto 1	0,05	0,05		Quarto 1	0,02	0,02	
	Quarto 2	0,13	0,11		Quarto 2	0,06	0,06		Quarto 2	0,01	0,01		Quarto 2	0,05	0,04	

12 %	3º pavimento	Cozinha	0,32	0,24	3º pavimento	Cozinha	0,04	0,04	3º pavimento	Cozinha	0,18	0,15	3º pavimento	Cozinha	0,11	0,08
		Banheiro	0,12	0,08		Banheiro	0,02	0,01		Banheiro	0,10	0,08		Banheiro	0,03	0,02
		Sala	0,15	0,15		Sala	0,07	0,07		Sala	0,15	0,13		Sala	0,07	0,06
		Quarto 1	0,13	0,11		Quarto 1	0,09	0,07		Quarto 1	0,09	0,08		Quarto 1	0,04	0,03
		Quarto 2	0,14	0,12		Quarto 2	0,09	0,08		Quarto 2	0,05	0,04		Quarto 2	0,04	0,04
		Cozinha	0,36	0,24		Cozinha	0,09	0,07		Cozinha	0,19	0,20		Cozinha	0,12	0,08
	Banheiro	0,13	0,09	Banheiro	0,04	0,02	Banheiro	0,11	0,09	Banheiro	0,06	0,04				
	Porosidade das portas 100%															
	Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D			
	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m
	térreo	Sala	0,15	0,15	térreo	Sala	0,06	0,05	térreo	Sala	0,20	0,19	térreo	Sala	0,09	0,07
		Quarto 1	0,11	0,10		Quarto 1	0,05	0,06		Quarto 1	0,04	0,05		Quarto 1	0,02	0,02
Quarto 2		0,11	0,12	Quarto 2		0,14	0,11	Quarto 2		0,06	0,05	Quarto 2		0,12	0,08	
Cozinha		0,42	0,28	Cozinha		0,06	0,05	Cozinha		0,19	0,16	Cozinha		0,13	0,09	
Banheiro		0,24	0,15	Banheiro		0,02	0,02	Banheiro		0,13	0,10	Banheiro		0,05	0,03	
3º	Sala	0,17	0,16	3º	Sala	0,11	0,11	3º	Sala	0,17	0,14	3º	Sala	0,07	0,06	

	pavimento	Quarto 1	0,12	0,11	pavimento	Quarto 1	0,10	0,08	pavimento	Quarto 1	0,12	0,10	pavimento	Quarto 1	0,03	0,03
		Quarto 2	0,10	0,12		Quarto 2	0,17	0,14		Quarto 2	0,02	0,03		Quarto 2	0,03	0,03
		Cozinha	0,44	0,28		Cozinha	0,06	0,06		Cozinha	0,22	0,22		Cozinha	0,13	0,09
		Banheiro	0,25	0,17		Banheiro	0,03	0,02		Banheiro	0,16	0,10		Banheiro	0,10	0,06
Porosidade das portas 100%																
Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D				
25 %	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m
		Sala	0,49	0,47		Sala	0,10	0,10		Sala	0,24	0,23		Sala	0,09	0,07
	térreo	Quarto 1	0,61	0,52	térreo	Quarto 1	0,11	0,10	térreo	Quarto 1	0,26	0,22	térreo	Quarto 1	0,04	0,04
		Quarto 2	0,13	0,14		Quarto 2	0,19	0,14		Quarto 2	0,04	0,04		Quarto 2	0,14	0,08
		Cozinha	0,56	0,47		Cozinha	0,11	0,10		Cozinha	0,30	0,27		Cozinha	0,11	0,09
		Banheiro	0,53	0,26		Banheiro	0,07	0,08		Banheiro	0,24	0,17		Banheiro	0,08	0,05
	3º pavimento	Sala	0,48	0,49	3º pavimento	Sala	0,18	0,20	3º pavimento	Sala	0,23	0,19	3º pavimento	Sala	0,10	0,09
		Quarto 1	0,47	0,41		Quarto 1	0,15	0,13		Quarto 1	0,32	0,21		Quarto 1	0,04	0,03
		Quarto 2	0,18	0,16		Quarto 2	0,28	0,18		Quarto 2	0,13	0,10		Quarto 2	0,05	0,05
		Cozinha	0,57	0,42		Cozinha	0,05	0,05		Cozinha	0,34	0,31		Cozinha	0,15	0,08

	a				a				a						
	Banheiro	0,51	0,25		Banheiro	0,09	0,03		Banheiro	0,26	0,19		Banheiro	0,12	0,07
Porosidade das portas 100%															
Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D			
Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m
térreo	Sala	0,24	0,27	térreo	Sala	0,13	0,12	térreo	Sala	0,23	0,22	térreo	Sala	0,09	0,09
	Quarto 1	0,12	0,13		Quarto 1	0,16	0,15		Quarto 1	0,21	0,21		Quarto 1	0,07	0,05
	Quarto 2	0,25	0,28		Quarto 2	0,15	0,13		Quarto 2	0,18	0,15		Quarto 2	0,13	0,08
	Cozinha	0,46	0,39		Cozinha	0,13	0,11		Cozinha	0,31	0,28		Cozinha	0,09	0,08
	Banheiro	0,55	0,34		Banheiro	0,08	0,06		Banheiro	0,27	0,19		Banheiro	0,06	0,03
3º pavimento	Sala	1,14	1,04	3º pavimento	Sala	0,20	0,18	3º pavimento	Sala	0,23	0,19	3º pavimento	Sala	0,10	0,09
	Quarto 1	0,99	0,86		Quarto 1	0,27	0,24		Quarto 1	0,31	0,24		Quarto 1	0,05	0,04
	Quarto 2	0,13	0,12		Quarto 2	0,26	0,19		Quarto 2	0,23	0,19		Quarto 2	0,06	0,06
	Cozinha	0,84	0,60		Cozinha	0,11	0,09		Cozinha	0,36	0,32		Cozinha	0,16	0,09
	Banheiro	0,74	0,38		Banheiro	0,09	0,07		Banheiro	0,32	0,22		Banheiro	0,18	0,10
Porosidade das portas 25%															

40 %

Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D			
Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m
térreo	Sala	0,21	0,23	térreo	Sala	0,11	0,11	térreo	Sala	0,26	0,25	térreo	Sala	0,14	0,10
	Quarto 1	0,09	0,19		Quarto 1	0,10	0,07		Quarto 1	0,17	0,12		Quarto 1	0,06	0,04
	Quarto 2	0,15	0,22		Quarto 2	0,10	0,07		Quarto 2	0,14	0,09		Quarto 2	0,07	0,04
	Cozinha	0,39	0,30		Cozinha	0,06	0,08		Cozinha	0,28	0,27		Cozinha	0,13	0,09
	Banheiro	0,28	0,23		Banheiro	0,13	0,08		Banheiro	0,14	0,20		Banheiro	0,10	0,06
3º pavimento	Sala	0,25	0,26	3º pavimento	Sala	0,23	0,16	3º pavimento	Sala	0,27	0,19	3º pavimento	Sala	0,10	0,09
	Quarto 1	0,10	0,21		Quarto 1	0,18	0,13		Quarto 1	0,21	0,17		Quarto 1	0,05	0,06
	Quarto 2	0,17	0,24		Quarto 2	0,18	0,13		Quarto 2	0,17	0,11		Quarto 2	0,05	0,07
	Cozinha	0,45	0,30		Cozinha	0,11	0,10		Cozinha	0,32	0,31		Cozinha	0,15	0,07
	Banheiro	0,31	0,26		Banheiro	0,22	0,14		Banheiro	0,15	0,22		Banheiro	0,08	0,07
Porosidade das portas 15%															
Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D			

	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m
	térreo	Sala	0,18	0,15	térreo	Sala	0,05	0,09	térreo	Sala	0,26	0,23	térreo	Sala	0,09	0,09
		Quarto 1	0,09	0,10		Quarto 1	0,09	0,08		Quarto 1	0,14	0,13		Quarto 1	0,06	0,05
		Quarto 2	0,11	0,10		Quarto 2	0,08	0,08		Quarto 2	0,14	0,09		Quarto 2	0,05	0,04
		Cozinha	0,36	0,30		Cozinha	0,05	0,04		Cozinha	0,28	0,26		Cozinha	0,14	0,12
		Banheiro	0,40	0,17		Banheiro	0,11	0,04		Banheiro	0,16	0,12		Banheiro	0,09	0,05
	3º pavimento	Sala	0,20	0,18	3º pavimento	Sala	0,12	0,13	3º pavimento	Sala	0,27	0,19	3º pavimento	Sala	0,09	0,08
		Quarto 1	0,11	0,13		Quarto 1	0,15	0,12		Quarto 1	0,19	0,15		Quarto 1	0,05	0,04
		Quarto 2	0,13	0,12		Quarto 2	0,14	0,11		Quarto 2	0,17	0,13		Quarto 2	0,03	0,03
		Cozinha	0,44	0,35		Cozinha	0,24	0,19		Cozinha	0,31	0,33		Cozinha	0,14	0,09
		Banheiro	0,43	0,18		Banheiro	0,18	0,06		Banheiro	0,17	0,13		Banheiro	0,07	0,04
Velocidade 3 m/s																
40 %	Porosidade das portas 100%															
	Apartamento A				Apartamento B				Apartamento C				Apartamento D			

Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m	Pavimento	Ambiente	Velocidade média h=1.5m	Velocidade média h=0.6m
térreo	Sala	0,92	0,88	térreo	Sala	0,20	0,18	térreo	Sala	0,34	0,33	térreo	Sala	0,13	0,14
	Quarto 1	0,37	0,41		Quarto 1	0,23	0,20		Quarto 1	0,27	0,23		Quarto 1	0,20	0,12
	Quarto 2	0,57	0,57		Quarto 2	0,24	0,23		Quarto 2	0,32	0,33		Quarto 2	0,09	0,08
	Cozinha	0,98	0,78		Cozinha	0,21	0,18		Cozinha	0,46	0,41		Cozinha	0,14	0,13
	Banheiro	0,90	0,48		Banheiro	0,12	0,09		Banheiro	0,41	0,28		Banheiro	0,10	0,06
3º pavimento	Sala	1,77	1,61	3º pavimento	Sala	0,30	0,27	3º pavimento	Sala	0,34	0,29	3º pavimento	Sala	0,15	0,14
	Quarto 1	1,58	1,37		Quarto 1	0,39	0,28		Quarto 1	0,34	0,29		Quarto 1	0,09	0,09
	Quarto 2	0,19	0,17		Quarto 2	0,40	0,35		Quarto 2	0,46	0,36		Quarto 2	0,08	0,07
	Cozinha	1,28	0,91		Cozinha	0,18	0,14		Cozinha	0,53	0,48		Cozinha	0,24	0,14
	Banheiro	1,11	0,58		Banheiro	0,14	0,11		Banheiro	0,48	0,33		Banheiro	0,27	0,15