



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo

TALITA ANDRIOLI MEDINILHA DE CARVALHO

IMPACTO DO DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE ABERTURAS NO
DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS NATURALMENTE VENTILADOS
PELA AÇÃO DOS VENTOS

THE IMPACT OF WINDOW SYSTEMS DIMENSIONING ON THERMAL
PERFORMANCE OF A WIND DRIVEN VENTILATED BUILDING

CAMPINAS

2017

TALITA ANDRIOLI MEDINILHA DE CARVALHO

IMPACTO DO DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE ABERTURAS NO
DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFÍCIOS NATURALMENTE VENTILADOS PELA
AÇÃO DOS VENTOS

THE IMPACT OF WINDOW SYSTEMS DIMENSIONING ON THERMAL
PERFORMANCE OF A WIND DRIVEN VENTILATED BUILDING

Dissertação de Mestrado apresentada a Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Unicamp, para obtenção do título de Mestra em Arquitetura, Tecnologia e Cidade, na área de concentração de Arquitetura, Tecnologia e Cidade.

Dissertation presented to the Faculty of Civil Engineering, Architecture, and Urbanism of the University of Campinas in partial fulfilment of the requirements for the degree of Master in Architecture, Technology, and Cities, in the area of Architecture, Technology, and Cities.

Orientadora: Profa. Dra. Lucila Chebel Labaki

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELA ALUNA TALITA ANDRIOLI MEDINILHA DE CARVALHO E ORIENTADA PELA PROFA. DRA. LUCILA CHEBEL LABAKI.

ASSINATURA DA ORIENTADORA



CAMPINAS

2017

Agência(s) de fomento e nº(s) de processo(s): CAPES, 01P04375/15

Ficha catalográfica
Universidade Estadual de Campinas
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

C314i Carvalho, Talita Andrioli Medinilha de, 1986-
Impacto do dimensionamento de sistemas de aberturas no desempenho térmico de edifícios naturalmente ventilados pela ação dos ventos / Talita Andrioli Medinilha de Carvalho. – Campinas, SP : [s.n.], 2017.

Orientador: Lucila Chebel Labaki.
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Janelas. 2. Ventilação natural. 3. Conforto térmico. 4. Fluidodinâmica computacional (CFD). 5. Simulação computacional. I. Labaki, Lucila Chebel, 1943-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

Título em outro idioma: The impact of window systems dimensioning on thermal performance of a wind driven ventilated building

Palavras-chave em inglês:

Window

Natural ventilation

Thermal comfort

Computational fluid dynamics (CFD)

Computer simulation

Área de concentração: Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Titulação: Mestra em Arquitetura, Tecnologia e Cidade

Banca examinadora:

Lucila Chebel Labaki [Orientador]

Alexandre Márcio Toledo

Leonardo Marques Monteiro

Data de defesa: 07-02-2017

Programa de Pós-Graduação: Arquitetura, Tecnologia e Cidade

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

IMPACTO DO DIMENSIONAMENTO DE SISTEMAS DE ABERTURAS NO DESEMPENHO
TÉRMICO DE EDIFÍCIOS NATURALMENTE VENTILADOS PELA AÇÃO DOS VENTOS

Talita Andrioli Medinilha de Carvalho

Dissertação de Mestrado aprovada pela Banca Examinadora, constituída por:

Profa. Dra. Lucila Chebel Labaki
Presidente e Orientadora/FEC-Unicamp

Prof. Dr. Alexandre Márcio Toledo
UFAL

Prof. Dr. Leonardo Marques Monteiro
USP

A Ata da defesa com as respectivas assinaturas dos membros encontra-se
no processo de vida acadêmica do aluno.

Campinas, 07 de fevereiro de 2017

Dedico este trabalho aos meus pais, Dimas e Edite, que foram um exemplo de respeito e amor pela natureza, economizando e reaproveitando recursos sempre que podiam.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha orientadora, Profa. Dra. Lucila Chebel Labaki, pela sua calma inspiradora e por acreditar no meu potencial. Por ter sido um exemplo de que é possível conciliar uma vida acadêmica com a dedicação à família.

Aos meus colegas do laboratório Lacaf por sua ajuda quando o desenvolvimento deste trabalho parecia impossível e pelas risadas que tornaram estes momentos mais leves. Ao Prof. Dr. Paulo Vatauvuk que colaborou para o meu aprendizado do programa Ansys CFX. A Profa. Dra. Leticia de Oliveira Neves por seus conselhos que mudaram o curso do trabalho ganhando em qualidade.

Agradeço aos meus pais, Dimas Luccas Medinilha e Edite Andrioli Medinilha, e ao meu esposo, Álvaro de Carvalho Neto, que sempre acreditaram em mim, quando nem mesmo eu acreditava. Aos meus primos Raoni Medinilha e Giuliano Alves da Cruz pelas correções dos meus textos em inglês. E a toda minha família e amigos pelo suporte mesmo com a minha ausência.

Agradeço à CAPES pela bolsa de mestrado, que permitiu a minha dedicação exclusiva a esta pesquisa.

RESUMO

A ventilação natural é uma estratégia passiva de resfriamento que pode contribuir para a redução do consumo energético em edifícios, mas sua aplicação requer conhecimento especializado e simulações demoradas. Para viabilizar o uso da ventilação natural aos projetistas são necessárias diretrizes simplificadas e confiáveis. Entretanto, as normas atuais sobre ventilação natural precisam de maior aprofundamento, pois elas apenas regulam o número de trocas de ar ou porcentagens de área de janelas, sem considerar outros parâmetros importantes. Neste sentido, o objetivo desta pesquisa foi investigar o impacto do dimensionamento de sistemas de aberturas no desempenho térmico de ambientes residenciais e ventilados pela ação dos ventos. O estudo se dividiu em três fases. Primeiro foi verificada a influência de diversos parâmetros geométricos de dimensionamento de sistemas de abertura na ventilação de um cômodo. O estudo foi realizado por simulação CFD (Dinâmica de Fluidos Computacional) através do software CFX ANSYS 16.2, que permitiu avaliar a velocidade e fluxo do ar. Na segunda fase foi investigado o efeito da obstrução do entorno e diferentes ângulos de incidência do vento no fluxo de ar. O objeto deste estudo foi um prédio residencial no formato de duplo “H” localizado em Piracicaba, SP. Também foi adotada a simulação em CFX ANSYS 16.2 para obtenção dos dados, simulando diferentes obstruções do entorno e variando os ângulos de incidência do vento. Então, dando continuidade a este experimento (fase três), foi verificada a influência de diversas configurações de sistemas de abertura no desempenho térmico do mesmo edifício. Desta vez foram simuladas várias configurações utilizando os softwares CFX ANSYS 16.2 e Energy Plus. O índice grau dia de conforto adaptativo foi adotado como indicador de desempenho térmico nesta fase. Os resultados da primeira fase indicam que a área de abertura não é o único parâmetro relevante para o dimensionamento de sistemas de ventilação pela ação dos ventos. Já na segunda fase ficou claro que o nível do pavimento onde a janela se encontra influencia a velocidade de entrada do ar. Também se observou que as obstruções do entorno têm maior influência no fluxo de ar do pavimento térreo. Por fim, o formato em “duplo H”, não provê boa ventilação em todos os apartamentos. Então, na terceira fase, foi identificado que em prédios baixos é importante considerar a posição da janela em planta, a altura acima do solo, a obstrução do entorno e a orientação da abertura. Pesquisas futuras poderiam seguir o mesmo procedimento para estender os resultados para outras regiões bioclimáticas e formatos de prédios. Por fim, o trabalho estimula a qualidade do ambiente construído por aprofundar os conhecimentos sobre o dimensionamento de aberturas visando boa ventilação natural, e assim contribui com a diminuição dos gastos energéticos para condicionamento artificial dos ambientes.

Palavras-chave: Janela, Ventilação natural, Conforto térmico, Fluidodinâmica computacional (CFD), Simulação computacional.

ABSTRACT

Wind driven ventilation is a passive cooling strategy that can be a powerful ally to reduce energy consumption in buildings, but it requires specialized knowledge and time investment. In order to make it more available to designers reliable and simplified guidelines are necessary. However, current ventilation standards require further developments since they only regulate minimal air change rate or percentages of window area, without considering other important parameters. In this regard, the purpose of this research is to investigate the impact of window systems dimensioning on thermal performance of a wind driven ventilated buildings. The study was divided into three steps. First, we investigated the influence of various geometric parameters of window systems dimensioning at the ventilation of a room. The simulations for the study occurred in CFD (Computational Fluid Dynamics), with the CFX ANSYS 16.2 software, and allowed to evaluate the airflow and wind speed. The second step intended to evaluate the effect of surroundings obstruction at different wind attack angle on the airflow. The object of this study is a residential building configured as a "double H" located in Piracicaba, São Paulo State (Brazil). The adopted method was using simulations in ANSYS CFX. Then, continuing this experiment (step three), it was verified the influence of different configurations of window systems on the thermal performance of the same building. In this experiment, several configurations were simulated with the software Energy Plus coupled with CFD (ANSYS CFX). The index Adaptive Comfort Degree-Days was adopted as a thermal performance indicator for this step. The results of the first step indicate that the opening area is not the only parameter to be considered to achieve proper natural ventilation; others criteria such as placement of the window on the façade, its proportion and orientation were also influential. The second step shows that the floor level influences the air velocity. It was also observed that the surroundings obstructions have greater influence on airflow at the ground floor. The shape of the studied building does not provide good ventilation in all apartments. Finally, at the third step, It was verified the best windows sizes for each situation. It was shown that proper window dimensions depend on the window location, building orientation and the presence of obstruction. The work provides simplified guidance to the windows design, thus, it stimulates the quality of the built environment and contributes to decreasing energy expenses with artificial conditioning.

Keywords: Window, Natural ventilation, Thermal comfort, Computational fluid dynamics (CFD), Computer simulation.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	ESTADO DA ARTE	14
2.1	O PAPEL DA VENTILAÇÃO PELA AÇÃO DOS VENTOS	14
2.2	DIRETRIZES PARA A VENTILAÇÃO PELA AÇÃO DOS VENTOS NO AMBIENTE EDIFICADO	17
2.2.1	Métodos para o dimensionamento de aberturas para ambientes ventilados pela ação dos ventos	17
2.2.2	Normas NBR 15575 e NBR 15220-3.	25
2.2.3	Programas de etiquetagem, Procel e Casa Azul.....	26
2.3	MÉTODOS PARA QUANTIFICAÇÃO DA VENTILAÇÃO PELA AÇÃO DOS VENTOS.....	29
2.4	INDICADORES DE CONFORTO TÉRMICO	32
2.4.1	Voto Médio Estimado (VME)	32
2.4.2	Método Adaptativo.....	33
2.4.3	Graus dia de conforto adaptativo.....	34
2.4.4	Movimento mínimo do ar	35
3	METODOLOGIA GERAL DA PESQUISA.....	36
3.1	Etapas da pesquisa	36
3.2	Clima de Piracicaba.....	38
4	RESULTADOS	42
4.1	THE INFLUENCE OF SEVERAL GEOMETRIC PARAMETERS OF WINDOW SYSTEMS DESIGN IN THE NATURAL VENTILATION OF A SMALL ROOM	43
4.1.1	Method.....	45
4.1.2	Results and discussion	49
4.1.3	Conclusion	58
4.2	THE INFLUENCE OF SURROUNDINGS OBSTRUCTION ON THE AIRFLOW OF A RESIDENTIAL BUILDING	60
4.2.1	Method.....	61
4.2.2	Results and discussion	64
4.2.3	Conclusion	73
4.3	BEST WINDOWS SIZES FOR DIFFERENT SURROUNDING OBSTRUCTION AND ORIENTATION IN A WIND DRIVEN VENTILATED BUILDING BASED ON THERMAL PERFORMANCE	74
4.3.1	Method.....	75

4.3.2	Results and discussion	82
4.3.3	Conclusion	90
5	CONCLUSÃO FINAL.....	92
	REFERÊNCIAS	94
APÊNDICE I.	CFX ANSYS 16.2–PHYSICS.....	103
APÊNDICE II.	CFX ANSYS 16.2– BOUDARY LIMIT LAYER, CCL EXPRESION.....	104
APÊNDICE III.	OPERATIVE TEMPERATURE OF EXPERIMENT 4.3	106

1 INTRODUÇÃO

No contexto mundial, especialmente em países desenvolvidos, a demanda energética tem crescido devido ao estilo de vida atual e a maior intolerância ao desconforto térmico (LAMBERTS *et al.*, 2008). No período de 1970 a 2013 o Brasil registrou um aumento de 56,68% no consumo de energia (BEN, 2016). Em 2015, 48,53% da energia produzida no Brasil foi gasta nos espaços construídos, o que demonstra que o potencial de economia do setor é alto (BEN, 2016). Neste sentido, Lamberts et al (2008) explicam que o projeto e método construtivo das edificações podem afetar diretamente o consumo de energia e recursos naturais, bem como o conforto térmico, portanto é necessário maior atenção a estes pontos. Dessa maneira, fica clara a necessidade de considerar em projeto estratégias passivas que levem em conta o clima onde a construção será implantada.

A Carta Bioclimática (GIVONI, 1992), um conhecido instrumento de conforto térmico que traça alguma destas estratégias, foi utilizado na elaboração do zoneamento bioclimático brasileiro - divisão do Brasil em 8 zonas climáticas, reunindo cidades com aspectos climáticos semelhantes (ABNT, 2005). Este aponta para a ventilação natural como principal estratégia para o conforto térmico no país e é também muito utilizada para o resfriamento térmico em outros climas tropicais (AFLAKI *et al.*, 2015).

A ventilação natural pode contribuir para a redução dos gastos com energia em climas quentes (PEREIRA *et al.*, 2013), mas para garantir a eficiência da estratégia é importante considerar métodos para minimizar o ganho de calor já na fase de projeto (AFLAKI *et al.*, 2015). Alguns exemplos citados pelos autores são: o sombreamento das aberturas, a correta orientação e forma do edifício, o tamanho das aberturas e o uso da vegetação.

A ventilação contribui para a renovação do ar com propósitos higiênicos, o conforto térmico e a diminuição da temperatura das superfícies das paredes e objetos (RIVERO, 1986). Além disso, pode induzir a uma sensação agradável (OHBA; TSUKAMOTO; LUN, 2013) que aumenta a tolerância ao desconforto térmico por calor (DEAR; BRAGER, 2002).



No entanto, apesar dos requisitos mínimos para o conforto térmico no Brasil terem sido revistos com a norma NBR 15575 (ABNT, 2013a, b, c), as normas de ventilação natural no mundo não avançaram. Elas ainda abordam apenas o aspecto higiênico, propondo um valor mínimo de troca de ar (ASHRAE, 2004; CÂNDIDO; DEAR; LAMBERTS, 2011), ou uma área mínima de aberturas (ABNT, 2013b).

Ambos os critérios atendem as necessidades de renovação do ar, mas pesquisas indicam que para satisfazer às necessidades de conforto térmico outros fatores devem ser considerados, como a topografia do entorno, direção e intensidade dos ventos, carga térmica, proporção e forma do edifícios, orientação, disposição e forma das aberturas (CÓSTOLA, 2006; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014; TOLEDO, 2006).

Sendo assim, faltam diretrizes simplificadas para aplicar a ventilação natural como estratégia passiva de resfriamento. Como consequência, a maioria dos arquitetos não tem condições de desenvolver um projeto eficiente no ponto de vista do conforto térmico. Para dimensionar as aberturas corretamente se faz necessário consultar especialistas, o que acarretaria em impacto de tempo e custo (CÓSTOLA, 2006), recursos muitas vezes indisponíveis aos construtores no Brasil.

Esta falta de informação pode representar um alto custo ambiental considerando o clima brasileiro e o número de casas que vem sendo construídas a cada ano. No ano de 2010 o censo (IBGE, 2011) divulgou que o número de domicílios no Brasil cresceu 22%, atingindo o número de 57 314 048. Assim é necessário investir em tecnologias passivas de baixo custo para tornar este crescimento sustentável à economia e ao ambiente.

Nesta perspectiva, o objetivo geral desta pesquisa é investigar o impacto do dimensionamento de sistemas de aberturas no desempenho térmico de ambientes residenciais e ventilados pela ação dos ventos. Os objetivos específicos são:

- ✓ Verificar a influência de diversos parâmetros geométricos de dimensionamento de sistemas de abertura na ventilação de um cômodo.
- ✓ Avaliar o efeito da obstrução do entorno na ventilação pela ação dos ventos em um prédio de quatro pavimentos.
- ✓ Verificar a influência de diversas configurações de sistemas de abertura no desempenho térmico deste edifício.



Não é objeto desta pesquisa avaliar a influência do efeito chaminé ou da ventilação mecânica nos estudos de caso. Também não são considerados diferentes valores de coeficientes de descarga das aberturas por falta de base de dados sobre o assunto. Além disso, não foi abordado o uso de dispositivos de sombreamentos de aberturas. Estes são aspectos de grande importância para o assunto e devem ser estudados em pesquisas futuras.

O trabalho está estruturado em cinco capítulos: o primeiro referente à presente introdução; a seguir, no capítulo dois, são apresentados os principais trabalhos e normas sobre ventilação natural em edifícios no Brasil, assim como as variáveis pertinentes ao tema; ainda neste capítulo são expostos métodos para quantificação da ventilação pela ação dos ventos, e os indicadores de conforto térmico mais relevantes.

No capítulo três são descritos os métodos adotados na pesquisa; o capítulo quatro apresenta os resultados da pesquisa na forma de artigo em língua inglesa. Por fim, o capítulo cinco expõe a conclusão do trabalho.



2 ESTADO DA ARTE

Este capítulo trata da função da ventilação em edifícios, assim como as principais pesquisas que abordaram o dimensionamento de aberturas com enfoque no conforto térmico. Também são apresentados os principais selos de eficiência energética e normas brasileiras e que fornecem diretrizes para o projeto de sistemas de ventilação. Por fim, são abordados os diversos métodos para a quantificação da ventilação pela ação dos ventos usando simulação computacional e os principais indicadores de conforto térmico.

2.1 O PAPEL DA VENTILAÇÃO PELA AÇÃO DOS VENTOS

A ventilação se dá por ação de vários fatores climáticos, como “a distribuição global sazonal da pressão do ar, a rotação da terra, a variação diária no aquecimento e resfriamento do solo, mar e da topografia”(GIVONI, 1992).

Este fenômeno tem grande importância para os ambientes internos, tendo três funções: a renovação do ar por motivos higiênicos, o conforto térmico e a diminuição da temperatura superficial das paredes e objetos (RIVERO, 1986). Apesar disso, os códigos de obras e normas de construção apenas contemplam a função higiênica, deixando de lado a contribuição da ventilação para o conforto térmico(CÓSTOLA, 2006).

Pesquisas nacionais e internacionais tem demonstrado que habitações de interesse social tem deficiências em vários aspectos, sendo um deles o conforto térmico (LABAKI; KOWALTOWSKI, 1998; SANTAMOURIS *et al.*, 2007). No Brasil, Labaki e Kowaltowski (1998) conduziram estudos em assentamentos de casas e concluíram que a arquitetura vernacular de Campinas não é adequada ao clima, mas pequenas modificações de projeto poderiam contribuir para uma melhora nas condições de conforto térmico das mesmas. Dando continuidade a esses estudos, Oliveira (2009) realizou pesquisa na mesma cidade investigando os efeitos de reformas de casas autoconstruídas para a ventilação de um quarteirão; para isso usou como ferramenta a simulação computacional em CFD (*Computational Fluid Dynamics, software Phoenix*) e deste modo pôde identificar que, na maior parte dos casos, as consequências destas reformas foram negativas, mostrando que



o aumento da área construída sem critérios causa alteração na direção dos ventos e redução de até 2,5m/s na sua velocidade.

Na sequência, Labaki et al. (2011) avaliaram os impactos de reformas em habitações autoconstruídas para a ventilação natural do seu interior, efetuando simulações em túnel de vento com quatro modelos selecionados a partir dos dados de Oliveira (2009). Com isso, foi observado que adendos à construção que resultam em alto percentual de ocupação do lote não promovem ventilação adequada para fins de conforto e qualidade do ar.

Ainda investigando ambientes residenciais de interesse social, Morais e Labaki (2013b) estudaram a ventilação natural em três tipologias de edifícios multifamiliares do programa governamental Minha Casa Minha Vida localizados em Campinas, e constataram que, embora muitos não alcancem a ventilação natural desejada, poucas modificações bastariam para melhorar este quadro, como por exemplo: orientação correta da implantação, posicionamento das aberturas, o aumento das reentrâncias na fachada e a assimetria na forma.

As experiências citadas acima demonstraram que um maior preparo técnico e critérios mais apurados para o dimensionamento de sistemas de aberturas poderiam levar a uma arquitetura de melhor desempenho térmico, menor impacto de vizinhança e sem aumentos significativos de custos. Para tanto, é necessário levar em conta os fatores que influenciam a ventilação no interior dos edifícios, como: a topografia do entorno, direção e intensidade dos ventos, a carga térmica, a proporção e forma do edifício e das aberturas, a orientação, disposição, tipo e área das aberturas (CÓSTOLA, 2006; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014; TOLEDO, 2006).

Terrenos na cidade e em descampados tem diferentes rugosidades devido às diferenças de densidade das construções e, portanto, diferentes intensidades de ventilação. Devido ao crescimento acelerado das cidades, o impacto da topografia do entorno na ventilação tem sido alvo de atenção nos últimos anos. Vem se investigando o impacto da alta densidade das edificações no meio urbano (BUCCOLIERI, 2011; NG *et al.*, 2011; YUAN; NG, 2012), assim como procedimentos para avaliar ou assessorar o desempenho dos ventos



neste cenário (ALLARD; GHIAUS, 2005; KUANG; CHEN; SUN, 2015; MIRZAEI; HAGHIGHAT, 2012).

Como citado anteriormente na pesquisa de Oliveira (2009), a densidade das construções do entorno pode mudar a direção e intensidade dos ventos, afetando diretamente a vazão da ventilação no interior dos edifícios. Uma mudança de 5º na incidência do vento pode alterar a vazão de 5% a 40% (CÓSTOLA, 2006). Outro fator que modifica a ventilação são as estações do ano, ocorrência tão relevante que pode servir para prever a direção predominante do movimento do ar em certas regiões, como é o caso de Maceió (TOLEDO, 2006); contudo a sazonalidade dos ventos não deve ser encarada como regra, pois em outros locais, como São Paulo, o ângulo de incidência é mais disperso (CÓSTOLA, 2006).

Além disso, as características das aberturas têm um papel importante no desempenho da ventilação no interior dos edifícios. A exemplo do coeficiente de descarga do caixilho, que tem sido objeto de pesquisa (IQBAL *et al.*, 2015; PERÉN *et al.*, 2015; WANG, H; KARAVA; CHEN, 2015; WANG, QN; GUAN; LIAO, 2014) e pode proporcionar um aumento de até quatro vezes na ventilação, ou seja, escolher o tipo certo de caixilho pode levar a uma economia na quantidade de janelas necessárias e por consequência a uma redução do custo da construção. Outra característica determinante é a orientação das aberturas, que pode representar até 20% de aumento na ventilação de um edifício (CÓSTOLA, 2006); a orientação também influencia na eficiência e função de sheds (LUKIANCHUKI; CARAM, 2012).



2.2 DIRETRIZES PARA A VENTILAÇÃO PELA AÇÃO DOS VENTOS NO AMBIENTE EDIFICADO

O Arquiteto João Filgueiras Lima, Lelé, ficou conhecido pela aplicação da ventilação como estratégia de conforto. No início da sua carreira, como projetava de maneira intuitiva, seus projetos apresentavam baixa eficiência quanto à ventilação. Com o tempo ele foi aprimorando suas técnicas e contratou pessoal especializado no tema e com isso teve grande progresso (LUKIANCHUKI; CARAM, 2012).

Este é um exemplo de como o conhecimento técnico predomina sobre a intuição, indicando a necessidade de critérios para o correto dimensionamento da ventilação. Como será apresentado na sequência, embora muitas políticas de incentivo (ASHRAE 55- Estados Unidos, Normativa Europeia (JANDA; BUSCH, 1994), *Australian Building Greenhouse Rating Scheme- Austrália*, *Building Energy Standards BEST- Cingapura*, NBR 15575, NBR 15220-3, Procel- Brasil) apresentem normas ou recomendações a fim de garantir o conforto térmico nas construções, nenhuma delas tem um conceito avançado para as recomendações de ventilação natural. As normas geralmente adotam um número mínimo de trocas de ar por hora, ou uma porcentagem da área do piso como sugestão para dimensionar janelas.

Este conceito de ventilação atende apenas fins higiênicos e funciona bem para países frios, mas em países quentes como o Brasil, a ventilação natural também é uma boa estratégia para o conforto térmico (GIVONI, 1992; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014; RIVERO, 1986). Portanto, é importante considerá-la criteriosamente dando enfoque ao comportamento do escoamento do ar ao formular recomendações para nosso país (TOLEDO, 2001).

2.2.1 Métodos para o dimensionamento de aberturas para ambientes ventilados pela ação dos ventos

A contextualização do tema “dimensionamento de aberturas em ambientes naturalmente ventilados” foi feita por meio da revisão bibliográfica sistemática, ou mapeamento sistemático; método que consiste na busca sistemática da literatura de um



tópico específico e visa identificar as publicações relevantes ao tema de maneira organizada (RUIZ-RUBE *et al.*, 2014) e analisá-los quantitativa e qualitativamente (ARANTES; LABAKI, 2016).

O mapeamento sistemático seguiu uma sequência de passos já utilizada por outras pesquisas da área (ARANTES; LABAKI, 2016; LOPES; CÓSTOLA; LABAKI, 2015). Para a busca foram adotadas seis (6) palavras-chaves ligadas através dos operadores booleanos: “OR” (função de “ou”, retorna resultados que contenham um termo ou o outro) e “AND” (função de “e”, retorna resultados que contenham ambos os termos). Na sequência estão listados os termos pesquisados:

- | | |
|--|---|
| • “ <i>Fenestration sizing</i> ”
OR | • “ <i>Window design</i> ”
OR |
| • “ <i>Window sizing</i> ”
OR | • “ <i>WWR</i> ” AND “ <i>Ventilation</i> ”
OR |
| • “ <i>Fenestration design</i> ” | • “ <i>Window to Wall Ratio</i> ” AND
“ <i>Ventilation</i> ” |
| OR | |

Estes termos foram pesquisados nas principais bases de dados conveniadas à Unicamp ou de livre acesso (*Revista Ambiente Construído*, *Scopus*, *Science Direct* e *Web of Science*). A busca foi restrita a artigos de revistas ou congressos e os termos foram buscados no título, resumo e palavras-chave dos artigos. Dessa maneira foram encontrados 366 artigos.

Os resultados passaram por duas (2) etapas de seleção: foram descartadas as duplicidades, foi verificado se os artigos abrangiam o tema da pesquisa (conforto térmico e ventilação pela ação dos ventos). Assim restaram apenas 24 artigos aderentes ao tema.

Concluída esta etapa iniciou-se a fase da análise dos artigos. Observando as datas das publicações (figura 1) é possível perceber que existe uma oscilação quanto à linha de crescimento de pesquisas no tema de busca. Nota-se que os anos de 2006, 2007 e 2015 foram os que tiveram o maior número de publicações, demonstrando que o interesse pelo tópico tem aumentado em pesquisas recentes.



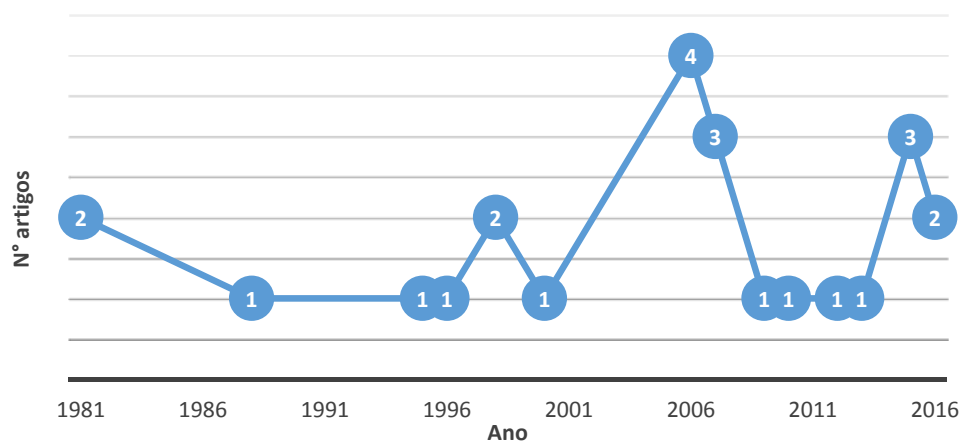


Figura 1. Número de artigos aderentes por ano de publicação.

O tema e método adotado pelos artigos aderentes é apresentado na figura 2. Observa-se que as variáveis mais pesquisadas são o coeficiente “Window to Wall Ratio” e o material de execução das janelas; em seguida, a dimensão, orientação, sombreamento e dimensionamento das janelas, que mostraram um interesse intermediário como tema de pesquisa. Por fim, a posição das janelas foi o assunto menos investigado. Quando se trata de índices de desempenho avaliados, os mais comuns foram o desempenho térmico e o consumo energético; sendo os menos usados dentre as pesquisas o conforto térmico e o desempenho da iluminação diurna.

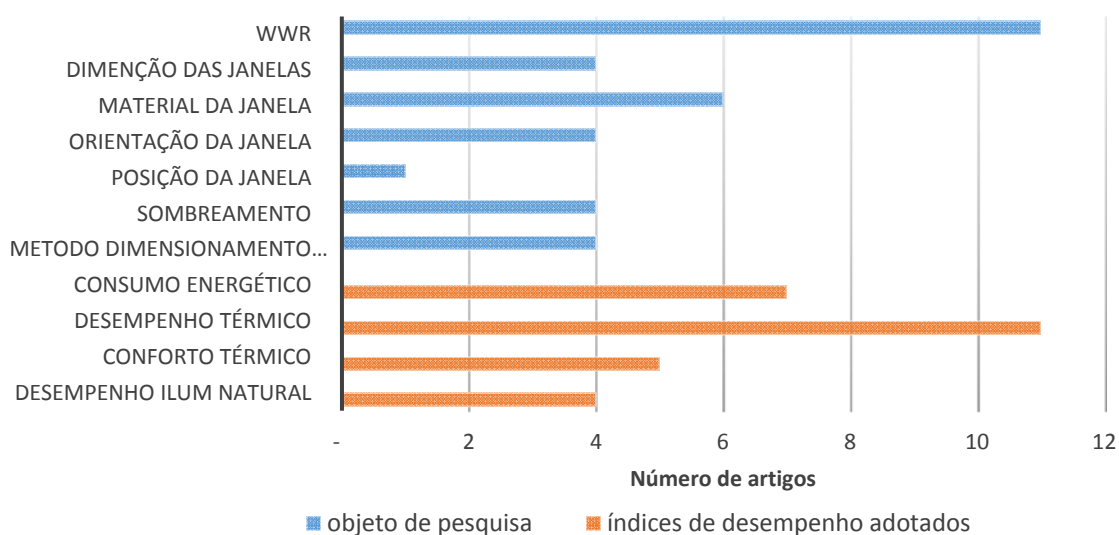


Figura 2. Publicações aderentes por variáveis pesquisadas e índices adotados pelos autores.



2.2.1.1 Aspectos gerais que influenciam a ventilação

Aflaki *et al.* (2015) realizaram revisão bibliográfica sobre a ventilação cruzada em climas tropicais. Segundo eles, a ventilação natural é recomendada para climas tropicais, principalmente quando o atraso térmico é pequeno, mas para maximizar a eficiência da estratégia também é preciso evitar o aquecimento do edifício. Algumas opções para prevenir isso são: o sombreamento, orientação solar e forma do edifício, tamanho das aberturas, vegetação do entorno, e materiais do envelope. Além disso, eles também apontam variáveis relevantes para uma boa ventilação natural, como o layout, orientação do prédio, o tamanho e localização das janelas.

A importância do sombreamento das aberturas foi confirmada por diversas pesquisas, como Xie *et al.* (2009) que realizaram estudo de campo em prédios tradicionais chineses e identificaram a relevância do sombreamento. As pesquisas de Wang, L; Hien (2006) e Wang, L; Wong Nyuk; Li (2007) investigaram os tamanhos ótimos de dispositivos horizontais para o sombreamento das janelas através de simulação, considerando o PMV (*Predicted Mean Vote*) como indicador de desempenho: assim apontaram que estes dispositivos são necessários em todas as orientações.

Outro fator relevante para se projetar um sistema de ventilação natural é a orientação das janelas com relação aos ventos predominantes; neste sentido, (ALI; MILAD; ALI, 2007) avaliaram a influência da posição vertical da janela e da direção do ataque do vento na temperatura do teto usando a simulação CFD; O modelo avaliado na pesquisa (figura 3) possui aberturas retangulares em paredes opostas e a altura do peitoril destas janelas (y) variou, enquanto o pé direito do modelo (H) ficou fixo. Assim a proporção y/H variou de 0.27, 0.36, 0.45, 0.54, até 0.63. Por fim foi possível concluir que a melhor situação para abaixar a temperatura do teto é a janela com peitoril alto; também argumentam que a ventilação tem melhor efeito quando a janela está posicionada de acordo com a direção de ataque do vento.



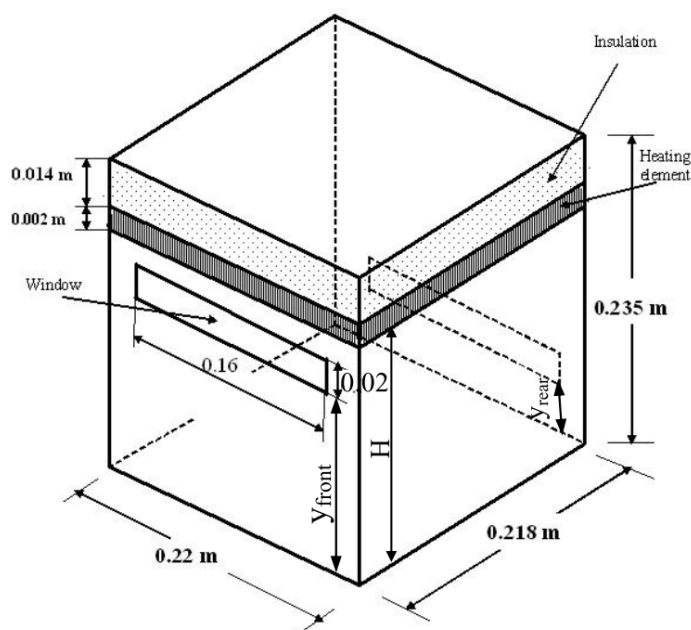


Figura 3. Modelo adotado para as simulações CFD. Fonte: (ALI; MILAD; ALI, 2007)

2.2.1.2 Relação entre o coeficiente *Window to Wall Ratio* e a ventilação

O coeficiente *Window to Wall Ratio* foi largamente discutido, abordando principalmente o ganho de calor devido à área envidraçada, mas a questão de como o tamanho das aberturas melhora a ventilação pela ação dos ventos foi pouco explorada. Na sequência serão apresentadas algumas pesquisas que abordam este aspecto.

Um estudo de caso em hospitais (STEPHEN NIMLYAT; ZIN KANDAR; SEDIADI, 2015) avaliou a performance de dois edifícios (figura 4) usando um índice chamado *indoor environmental quality* (IEQ), que é uma avaliação conjunta de vários parâmetros: conforto térmico, acústico, visual e qualidade do ar. Concluiu-se que plantas abertas propiciam melhor performance (ventilação e iluminação) que ambientes com muitas divisões e corredores.





Figura 4. Plateau Specialist Hospital e Jos University Teaching Hospital, da esquerda para direita.
Fonte: (STEPHEN NIMLYAT; ZIN KANDAR; SEDIADI, 2015)

Zmeureanu (1988) relacionou parâmetros como o WWR e a ventilação natural ao isolamento térmico em casas localizadas em Montreal, avaliando o custo benefício para propor o isolamento térmico mais vantajoso para o clima frio. Foi apontado que o isolamento térmico com melhor custo-benefício é inferior aos recomendados para região.

2.2.1.3 Métodos de dimensionamento de sistemas de ventilação

As pesquisas descritas a seguir buscaram fornecer subsidio para o dimensionamento de sistemas de ventilação de forma direta - propondo um método de dimensionamento - ou indireta – apresentando recomendações de dimensões.

TABESH e SERTYESILISIK (2016) analisaram o WWR ideal para átrios e pátios internos considerando diferentes climas da Turquia (frio –Erzurum-, ameno e úmido- Istanbul- e quente e seco -Diyarbakir) e tipos de vidros (simples, duplo e triplo). Os modelos foram simulados através do programa de simulação energética DesignBuilder; a

figura 5 apresenta um esquema da variação paramétrica dos modelos. Assim, apontaram que a melhor configuração foi o WWR de 40% para qualquer tipo de vidro e que, analisando apenas a energia para o resfriamento, o melhor WWR foi de 80% para todos os climas analisados.



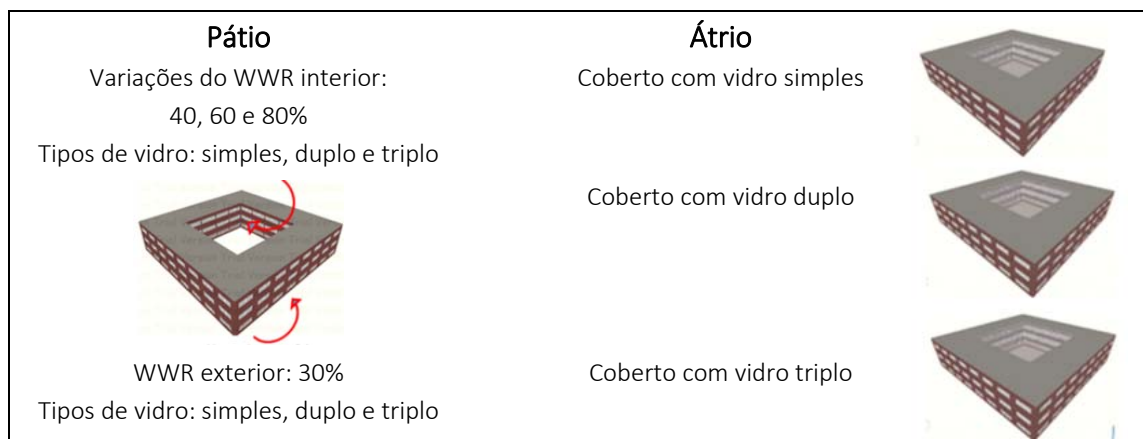


Figura 5. Variação dos modelos simulados. Fonte: TABESH e SERTYESILISIK (2016)

A área e a posição da janela também foram investigadas na China (HUO; HU; LI, 2013) através de simulação CFD (*Computational Fluid Dynamics*). O estudo, apesar de simplificado, confirmou que janelas grandes aumentam a ventilação de um cômodo e que a orientação das aberturas influencia na ventilação. Outro estudo chinês (JIAN, 2007) também recomenda janelas grandes, mas apenas na face sul, além disso, o autor argumenta que os valores ótimos são alcançados com o sombreamento da janela e utilizando a ventilação noturna.

Pesquisa realizada na Califórnia fez recomendações simplificadas sobre o tamanho das aberturas baseado em um cálculo prescritivo de ganho de calor (AL-SALLAL, 1998). Suga; Kato; Hiyama (2010) e Khemlani (1995) propuseram um método de dimensionamento de aberturas para uma das faces de um cômodo, sendo que o primeiro leva em conta o consumo energético, custo, iluminação e ventilação para identificar o WWR ideal. Já o segundo também se baseia na iluminação e no desempenho térmico, mas não considera o aquecimento solar, além de não poder ser aplicado a climas quentes.

Na Turquia (INANICI; DEMIRBILEK, 2000) também foi avaliado o tamanho de janelas em apenas uma face do edifício (sul) considerando o WWR de 25 a 90% e a proporção do edifício, realizando simulação energética através do programa SUNCODC-PC. Foi adotado como estudo de caso um edifício residencial de três pavimentos (figura 6) onde foi avaliado apenas o pavimento intermediário, de forma que a influência do solo e da cobertura não foi analisada. A ventilação do edifício é híbrida e foi aplicado um controle de



abertura das janelas, onde elas são abertas quando a temperatura está entre 24° e 26°C. Por fim, recomendou-se janelas pequenas (25%) para climas quentes (Erzurum e Ankara), já para climas frios, janelas grandes (Diyarbakir, Izmir e Antalya). Isso ocorreu porque nos climas quentes a janela maior provoca aumento do ganho de calor por áreas envidraçadas.



Figura 6. Plantas do modelo com proporção 1:1. Fonte: (INANICI; DEMIRBILEK, 2000)

Pesquisa similar foi realizada no Brasil (RUPP; GHISI, 2012), na qual o método de dimensionamento de aberturas visou atender a ventilação híbrida e iluminação em prédios de escritórios (baseado no consumo de energia elétrica); o sistema propõe um intervalo de tamanhos de janelas ideal para várias situações considerando a proporção do prédio e a orientação. A Tabela 1 apresenta um intervalo de áreas ideais das janelas baseado no consumo energético.

Como se observa, dentre estes artigos aderentes poucos propõem métodos de dimensionamento de sistemas de ventilação levando em conta a ventilação pela ação dos ventos e ainda faltam métodos de dimensionamento que considerem os outros fatores relevantes para ventilação apropriada, especialmente no ambiente residencial.



Tabela 1. Intervalo de área das janelas para cada estudo de caso, orientação, geometria e proporção. Fonte: (RUPP; GHISI, 2012)

Amplitude da área das janelas (%)										
Caso	Orientação	Geometria 2:1			Geometria 1:1			Geometria 1:2		
		K=0.8	K=2.0	K=5.0	K=0.8	K=2.0	K=5.0	K=0.8	K=2.0	K=5.0
1	Norte	10	10-20	10-30	10	10-20	10-40	10-20	10-30	10-50
	Sul	10-20	10-30	10-70	10-20	10-40	10-100	10-30	10-60	10-100
	Leste	10	10-20	10-30	10	10-20	10-40	10-20	10-30	10-60
	Oeste	10	10-20	10-30	10	10-20	10-30	10-20	10-20	10-50
2	Norte	10-20	30-50	10-100	21	50-80	10-70	30-50	10-100	10-60
	Sul	20-40	40-90	40-100	20-50	70-100	10-100	20-40	70-100	10-100
	Leste	10-20	30-50	10-100	20-30	40-80	10-100	30-50	10-100	10-70
	Oeste	10-20	30-50	10-100	21	40-80	10-50	30-50	10-100	10-50
3	Norte	10-30	10-70	10-100	10-40	10-60	10	10-70	10-100	10
	Sul	10-40	10-70	10-100	10-40	10-70	10	10-60	10-100	30-100
	Leste	10-30	10-50	20-100	10-40	10-60	20-100	10-50	10-80	30-100
	Oeste	10-30	10-50	20-100	10-30	10-60	20-100	10-50	10-80	30-100
4	Norte	20-40	40-100	60-100	20-50	50-100	40-100	40-100	60-100	30-100
	Sul	20-40	40-100	50-100	30-60	70-100	40-100	30-60	70-100	40-100
	Leste	20-30	30-70	40-100	20-40	60-100	40-100	40-80	40-100	30-100
	Oeste	20-30	40-70	60-100	20-40	60-100	40-100	40-90	50-100	30-100
$K = \frac{W.D}{(W+D).h}$ Onde K é um índice (não-dimensional); W é a largura total do ambiente (m), D é a profundidade total do ambiente (m) e h é a altura entre a superfície de trabalho e o teto (m).										

2.2.2 Normas NBR 15575 e NBR 15220-3.

A norma NBR 15220 (ABNT, 2003) propõe a divisão do Brasil em 8 zonas climáticas (Zoneamento Bioclimático), e traça diretrizes construtivas para cada uma destas zonas com base nas recomendações de Givoni (1992). Para tanto, são propostos limites de: transmitância térmica, atraso térmico, fator de calor solar e tamanho das aberturas; o último critério descreve a área ideal de abertura para cada zona, e a tabela que segue delimita valores para tamanhos de janelas pequenas, médias e grandes.



Tabela 2-Aberturas para ventilação de acordo com a área do piso.

Aberturas para ventilação	A (em % da área de piso)
Pequenas	$10\% < A < 15\%$
Médias	$15\% < A < 25\%$
Grandes	$A > 40\%$

Fonte: NBR 15220-3, p17

Recentemente foi proposta a norma NBR 15575 (ABNT, 2008, 2013b, c) que trata do: desempenho estrutural, segurança contra incêndio e no uso e operação, funcionalidade e acessibilidade, conforto tátil e antropodinâmico, desempenho térmico, acústico e lumínico, estanqueidade à água, durabilidade e manutenção predial. Aqui serão comentados apenas os sistemas de avaliação de conforto térmico simplificado.

A norma leva em consideração o envelope do prédio; para tanto são traçados limites de capacidade e transmitância térmica para os sistemas de vedação e coberturas. Além disto, também são colocados limites para a dimensão das aberturas para cidades onde estes não forem especificados pelo código de obras, pedindo tamanho médio para as zonas de 1 a 7 (maior ou igual a 7% da área do piso) e grande para a zona 8 (se localizada na Região Norte do Brasil, maior ou igual a 12% da área do piso, quando na Região Nordeste e Sudeste do Brasil, maior ou igual a 8% da área do piso). Esses valores são menores que o proposto pela NBR 15220. Nota-se que apesar das recomendações para o conforto terem sido revistas na NBR 15575 (ABNT, 2008, 2013b, c) o método simplificado para o dimensionamento de aberturas não evoluiu.

2.2.3 Programas de etiquetagem, Procel e Casa Azul

O Programa Brasileiro de Etiquetagem Procel Edifica (PBE) propõe dois métodos diferentes, o RTQ-C (INMETRO, 2013a) para edifícios comerciais e o RTQ-R (INMETRO, 2013b), para residenciais. De acordo com os objetivos desta pesquisa aqui será exposto apenas o último método.

De acordo com este modelo, são atribuídas etiquetas de “A” a “E”, para a classificação e são avaliados três pontos (envoltória para resfriamento, aquecimento e



refrigeração) para os quais são atribuídos equivalentes numéricos que mais tarde serão pesados para determinar a pontuação final do prédio.

O método adota como requisitos mínimos os parâmetros termofísicos de acordo com as normas brasileiras de desempenho térmico. Para a área mínima das aberturas segue a norma NBR 15575. Com relação à circulação de ar de banheiros aceitam-se aberturas voltadas para poço de ventilação ou até forros ventilados, mas para se obter nível “A” é necessário que pelo menos 50% deles sejam naturalmente ventilados. Ainda neste tópico, coloca-se como essencial a possibilidade de fechamento das aberturas em locais onde as médias mensais das temperaturas mínimas sejam menores que 20°C ou que sejam localizados nas zonas bioclimáticas 1 a 7. Para as zonas 2 a 8 também é exigida a ventilação cruzada, de forma que quanto mais bem distribuídas forem as aberturas, melhor (ver tabela 3). No caso da iluminação natural impõe que, para ambientes de permanência prolongada, seja disponibilizada uma iluminação natural correspondente a 12,5% da área útil do mesmo, independente da zona bioclimática.

Tabela 3- fórmula para ventilação cruzada, RTQ-R (INMETRO, 2013b).

$A2/A1 \geq 0,25$
A1: somatório área de ventilação nas fachadas da orientação com maior área de abertura.
A2: somatório área de ventilação nas fachadas das demais orientações.

Já o Selo Casa Azul (CAIXA ECONÔMICA FEDERAL, 2010) é aplicável a projetos habitacionais em que as unidades sejam avaliadas em até R\$ 130.000,00 e financiadas pela CAIXA. No sistema é possível se alcançar três níveis de sustentabilidade, BRONZE (atendendo aos critérios obrigatórios), PRATA (atendendo a 6 critérios além dos obrigatórios), OURO (atendendo a 12 critérios além dos obrigatórios). Para tanto são propostos 53 critérios de avaliação (18 obrigatórios) que abrangem: “Qualidade Urbana”, “Conservação de Recursos Materiais”, “Gestão da Água”, “Práticas Sociais”, “Eficiência Energética” e “Projeto e Conforto”.

O programa também incentiva a preocupação com a ventilação, como por exemplo: para o requisito *Relação com a vizinhança*, espera-se que na implantação do



prédio seja levado em consideração o impacto ambiental da ventilação nos terrenos confrontantes, porém, não é instituído um método de análise quantitativo. Para avaliar o desempenho térmico – orientação ao sol e ventos, o selo se apoia nas diretrizes construtivas do zoneamento bioclimático apresentado na NBR15220. Além disso, é exigida a existência de aberturas voltadas para o exterior atendendo a área mínima de ventilação.

Portanto, no que tange a ventilação movida pelos ventos o Selo Azul da Caixa, apenas exige a adoção das normativas vigentes, sem propor grandes alterações.



2.3 MÉTODOS PARA QUANTIFICAÇÃO DA VENTILAÇÃO PELA AÇÃO DOS VENTOS

A predição da vazão no interior de um edifício devido a ação dos ventos pode ser calculada através de diversos modelos, manuais ou da simulação. Como nesta pesquisa optou-se pelo uso da simulação, serão apresentados os métodos mais usados, o nível de incertezas relacionados a cada um, e também as principais variáveis a serem consideradas.

Os principais métodos que utilizam a simulação para prever a vazão do ar são o *Airflow Network* (AFN) e o *Computational Fluid Dynamics* (CFD), sendo o último mais preciso.

Segundo TRINDADE; PEDRINI e DUARTE (2010) o método CFD foi inicialmente utilizado na indústria aeroespacial, mas atualmente tem sido muito usado em muitos campos como a arquitetura e engenharia. Alguns exemplos de softwares CFD são o CFX ANSYS, Fluent ANSYS, Phoenix CHAM, e FloVENT ELINTER.

ASFOUR e GADI (2007) explicam que “O modelo CFD se baseia no conceito de dividir a solução do domínio em subzonas. Então, para cada zona, as equações de conservação de massa, momento, e energia são resolvidas se utilizando de computadores potentes”. A seguir os passos do *workflow* em modelos CFD:

- Modelagem do objeto de estudo e do domínio
- Geração da malha
- Definição do código de solução (tipo de simulação, modelo de turbulência e transferência de calor, e critérios de convergência)
- Simulação do modelo

Já o modelo *Airflow network* (AFN) “é representado por um grupo de nós, simulando as aberturas do edifício, e um grupo de linhas, simulando o percurso do fluido”(ASFOUR; GADI, 2007). Os softwares ESP-r e Energy Plus são exemplos de AFN. O *workflow* para modelagem da *Airflow network* segue os seguintes passos:

- Modelagem do edifício
- Especificação do coeficiente de pressão e de descarga
- Configuração do edifício
- Simulação do modelo

Quando se trata simulação da ventilação pela ação dos ventos, o AFN apresenta a vantagem de considerar diversas incidências e velocidades do vento, simular grandes períodos (exemplo: um ano), além de também simular o problema em um tempo



consideravelmente menor. Já o CFD apenas considera uma direção e intensidade do vento por vez, e soluciona o problema para apenas um instante. Apesar destas diferenças, é importante reforçar que a fidelidade dos resultados do CFD é maior que em AFN e que os dois modelos podem ser usados em conjunto produzindo melhores resultados.

Na sequência serão apresentados alguns conceitos importantes para estas simulações: o perfil de camada limite, o coeficiente de pressão e o coeficiente de descarga.

O vento na superfície terrestre sofre alterações no escoamento devido a aspectos geomorfológicos, sendo que quanto mais distante da superfície maior a velocidade do vento. A velocidade do vento vai aumentando até uma altura onde esta é menor ou igual a 99% da velocidade no escoamento não perturbado: esta altura representa a espessura da camada limite (MORAIS; LABAKI, 2013b).

Existem três tipos de perfil de camada limite (convectiva, estável e neutra), que são determinados pela natureza e quantidade da turbulência no momento. O perfil de camada limite convectiva ocorre em dias quentes e é caracterizado por ser turbulento. A altura da camada limite nestes dias pode alcançar até 1000m. Já o perfil de camada limite estável ocorre à noite e é pouco turbulento. Por fim, o perfil de camada limite neutra ocorre em dias nublados e costuma ser adotado em simulações (CÓSTOLA, 2006).

Como o CFD pode ser aplicado para diversos fluidos e em diferentes condições, é necessário inserir um perfil logaritmo para representar a camada limite. Já para o AFN isso não é necessário, pois como estes programas são geralmente específicos para edifícios, o perfil da camada limite já está inserido no seu algoritmo (ENERGY, 2015).

Para a simulação AFN também é necessário inserir valores de coeficiente de pressão para cada abertura que irá compor o sistema de ventilação pela ação dos ventos. “Define-se Coeficiente de Pressão (C_p), o quociente adimensional da pressão dinâmica medida em um ponto x na parede do modelo (P_x) pela pressão dinâmica do fluxo de ar (vento) não perturbado (P_d)” (CÓSTOLA, 2006).

O uso de valores corretos de coeficientes de pressão é essencial para a fidelidade dos resultados (BAHARVAND, 2010; KARAVA; STATHOPOULOS; ATHIENITIS, 2006; LUKIANTCHUKI *et al.*, 2016; TOLEDO, 2006). A obtenção destes valores pode se dar através de cálculos manuais, busca nas bases de dados, e simulação em CFD ou em túnel de vento.



Apesar da rapidez e praticidades dos dois primeiros métodos, a simulação por CFD ou túnel de vento é recomendada pois garante maior confiabilidade nos resultados (CÓSTOLA; ALUCCI, 2007).

As configurações das aberturas também devem ser inseridas na AFN, sendo o coeficiente de descarga tão relevante quanto a área das aberturas. Este coeficiente está relacionado com o modelo de esquadria e tipo de abertura da janelas e representa a perda de carga no escoamento (TOLEDO, 2006).

Apesar de muito importante, ainda se sabe muito pouco sobre este coeficiente (ENERGYPLUS, 2015; LUKIANTCHUKI *et al.*, 2016). As bases de dados sobre o assunto são incompletas e consideram um valor fixo para cada tipo de abertura. Estudo recente demonstrou que fatores como a incidência do vento e a porosidade do edifício, bem como a configuração da janela podem afetar o coeficiente, de forma que um mesmo tipo de abertura pode apresentar vários coeficientes de descarga (P. KARAVA; T. STATHOPOULOS; ATHIENITIS, 2011).

Por fim, para se produzir resultados confiáveis utilizando CFD ou AFN, o modelo deve ser configurado criteriosamente. O trabalho de (CÓSTOLA, 2006) buscou definir um método para a quantificação da ventilação pela ação dos ventos na escala do edifício através do CFD e AFN, e serviu como referência para as configurações adotadas na atual pesquisa.



2.4 INDICADORES DE CONFORTO TÉRMICO

O ser humano tem a capacidade de manter sua temperatura estável através das trocas de calor com o meio por condução, radiação, convecção, perspiração, transpiração e trocas na respiração (FANGER, 1970). Estas trocas envolvem na maior parte (exceto a condução e radiação) a presença de ar, demonstrando que o elemento é essencial à manutenção da vida, não somente devido à produção de energia pela respiração, mas também para a homeotermia (FANGER, 1970; RIVERO, 1986).

Embora o bem estar térmico dependa de fatores físicos, ele também é influenciado por variáveis psicológicas como: a experiência térmica, a expectativa e *alliesthesia*¹ térmica (DACANAL, 2011; DEAR; BRAGER, 2002; RUAS, 2002). Assim, o conforto térmico pode ser definido como “o estado da mente que expressa satisfação com o ambiente térmico” (ASHRAE, 2013).

Devido à complexidade ao se considerar fatores psicológicos em modelos matemáticos para avaliar a satisfação térmica, têm sido desenvolvidos indicadores de conforto que levam em conta apenas variáveis físicas, desta forma viabilizando avaliar o conforto em situações climáticas variadas e para então melhor adequá-las (RUAS, 2002). Deste modo, foram desenvolvidos vários indicadores de conforto térmico, dentre os quais se destacam; o Voto Médio Estimado (VME), o modelo adaptativo, graus dia de conforto adaptativo e o movimento mínimo do ar.

2.4.1 Voto Médio Estimado (VME)

Para obter uma relação entre dados climáticos e a sensação de conforto térmico, Fanger (1970, p. 112) realizou experimentos com 256 pessoas treinadas sob condições climáticas controladas e somou estes resultados a pesquisas análogas (MCNALL JR, P. E., JAAX, J., ROHLES, F. H., NEVINS, R. G., & SPRINGER, 1967; NEVINS *et al.*, 1966) formando uma base de dados de questionários com 1396 pessoas. A partir destes foi elaborada a Equação do Conforto, para a qual também foram desenvolvidas várias tabelas para facilitar

¹ Alliesthesia é uma palavra inglesa. Quando aplicada ao conforto térmico se refere à porção afetiva do bem estar térmico, sugerindo que o conforto térmico de um indivíduo é determinado tanto pelo estado térmico geral como pelo próprio ambiente (PARKINSON; DE DEAR; CANDIDO, 2015).



sua aplicação. O método pede como dados de entrada parâmetros individuais (atividade realizada pelo usuário, resistência térmica do vestuário) e climáticos (temperatura do ar, umidade do ar, velocidade do ar e temperatura média radiante) e fornece como resultado uma escala de sensação térmica, de sete pontos, chamada de Voto Médio Estimado (VME), que varia de -3 (muito frio) a 3 (muito calor), sendo 0 a neutralidade térmica. Além disso, também se observa que sempre haverá uma porcentagem de insatisfeitos, mesmo para uma situação de neutralidade térmica, relacionando-se a Equação de Conforto com a Porcentagem Estimada de Insatisfeitos (PEI). Este método é adequado a ambientes internos e artificialmente condicionados

2.4.2 Método Adaptativo

O método adaptativo teve origem no trabalho de Humphreys (1975), apud Dear e Brager (1998), que propôs a Temperatura Neutra (baseado na temperatura operativa interna). Foi neste contexto que Dear e Brager (1998) realizam um levantamento publicado como RP-884, no qual foram recolhidos dados climáticos internos e externos e questionários referentes a vestimenta, sensação térmica e preferência térmica, com a colaboração de pesquisadores de várias partes do mundo. A partir destas informações foi possível desenvolver um modelo térmico (chamado de modelo adaptativo), que relaciona a temperatura operativa com temperatura externa efetiva. Mais tarde, em 2013, este método foi adotado pela norma americana ASHRAE 55, 2013 como modelo de conforto térmico para ambientes naturalmente ventilados, conforme visto no gráfico apresentado na figura 7.



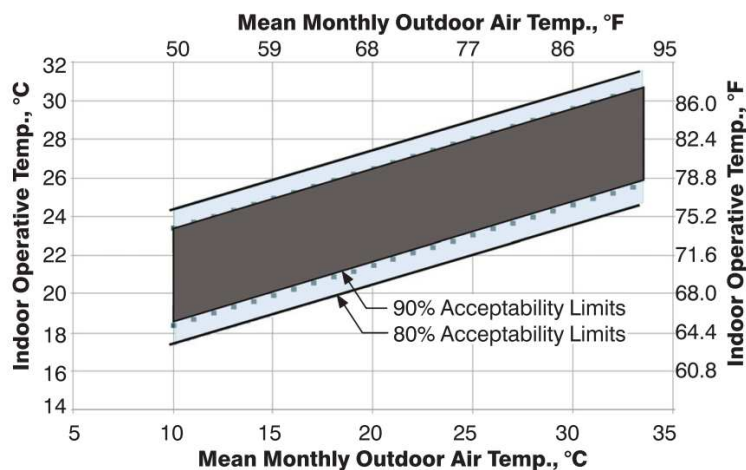


Figura 7. Limites aceitáveis para a temperatura operativa segundo o modelo adaptativo em ambientes naturalmente ventilados, com velocidade até 0,3m/s. Fonte: (ASHRAE, 2013).

Além disto, o trabalho consegue demonstrar que para o usuário se apresenta uma maior amplitude na temperatura aceitável quando possui controle sobre a abertura das janelas em ambientes naturalmente ventilados, do que quando submetidos a ambientes condicionados com uma temperatura fixa. Na tabela 4 é proposto o aumento dos limites de conforto térmico conforme a ventilação aumenta.

Tabela 4. Aumento dos limites de temperatura operativa para o modelo adaptativo de acordo com a velocidade do ar.

Velocidade média do ar 0,6m/s	Velocidade média do ar 0,9m/s	Velocidade média do ar 1,2m/s
1,2°C	1,8°C	2,2°C

Fonte: (ASHRAE, 2013)

2.4.3 Graus dia de conforto adaptativo

O índice foi proposto por McGilligan; Natarajan; Nikolopoulou (2011) e se baseia no índice análogo graus dia de aquecimento ou resfriamento. O índice proposto quantifica quantos graus a temperatura de um ambiente esteve fora da faixa de conforto térmico baseada no modelo adaptativo e pode ser calculado para o aquecimento ou resfriamento, conforme segue:



Graus Dia de Conforto Adaptativo (aquecimento) = $T_i - L_s$

Graus Dia de Conforto Adaptativo (resfriamento) = $L_i - T_i$

T_i = temperatura interna

L_s = limite superior de conforto adaptativo

L_i = limite inferior de conforto adaptativo

Enquanto o conforto adaptativo permite apenas identificar se no momento a sensação térmica do usuário está dentro ou fora da faixa de conforto, o índice Graus Dia de Conforto Adaptativo permite uma análise de intensidade do desconforto experimentado.

2.4.4 Movimento mínimo do ar

Com intuito de investigar a sensação térmica e a ventilação desejável, CÂNDIDO et al. (2011) realizaram dois experimentos em Maceió (Brasil) questionando os participantes sobre a preferência quanto ao movimento do ar (maior ou menor velocidade do ar). Então, através de análise estatística, propuseram limites para a ventilação adequada em ambientes internos. Foram estabelecidos valores mínimos de velocidade do ar para determinadas faixas de temperatura, como visto na tabela 5.

Tabela 5. Movimento mínimo do ar.

TEMPERATURA OPERATIVA INTERNA (°C)	VELOCIDADE DO AR MIN (m/s)
24-27	0.4<
27-29	0.41–0.8
29-31	>0.81

Fonte: adaptado de CÂNDIDO et al. (2011)

A partir desses estudos o movimento mínimo do ar passou a ser considerado um indicador de conforto em clima tropical, e tem sido aplicado em pesquisas sobre ventilação pela ação dos ventos (LUKIANCHUKI et al., 2016; MORAIS; LABAKI, 2013a).



3 METODOLOGIA GERAL DA PESQUISA

3.1 ETAPAS DA PESQUISA

A pesquisa foi realizada em duas etapas. Na primeira foi investigado um cômodo hipotético de 16m², e a segunda e terceira tiveram como objeto um edifício residencial de 4 pavimentos localizado em Piracicaba, SP (zona bioclimática 2).

Em cada etapa do estudo foram derivadas outras situações a partir do modelo de referência, possibilitando estudar os parâmetros definidos em cada fase. A descrição de cada modelo e do método detalhado serão abordados no capítulo quatro (Resultados) no subitem referente ao método de cada experimento. A seguir estão brevemente descritos os passos da pesquisa:

- ✓ Etapa 1- Verificar a influência de diversos parâmetros geométricos de dimensionamento de sistemas de abertura na ventilação de um cômodo.
 - ✓ Definir modelo para a etapa.
 - ✓ Estabelecer os parâmetros a serem testados.
 - ✓ Simular variações no modelo através do software de CFD (CFX Ansys 16.2).
 - ✓ Identificar os parâmetros que representam maior impacto para a ventilação interna do cômodo (passo que definirá aqueles que serão utilizados na terceira etapa).
- ✓ Etapa 2- Avaliar o efeito da obstrução do entorno na ventilação pela ação dos ventos em um prédio de quatro pavimentos.
 - ✓ Definir o edifício de referência para a etapa.
 - ✓ Levantar os dados do edifício.
 - ✓ Simular variações no modelo através do software de CFD (CFX Ansys 16.2).
 - ✓ Avaliar a qualidade da ventilação natural do edifício
- ✓ Etapa 3- Verificar a influência de diversas configurações de sistemas de abertura no desempenho térmico do edifício da etapa 2.
 - ✓ Obter os coeficientes de pressão através de CFD (CFX Ansys 16.2).



- ✓ Simular variações nas configurações do modelo através do software Energy Plus.
- ✓ Identificar as configurações de aberturas que promovem melhores condições de conforto térmico.



3.2 CLIMA DE PIRACICABA

O município de Piracicaba está situado a sudoeste do estado de São Paulo, Região Metropolitana de Campinas (figura 8). Situa-se nas coordenadas geográficas: latitude 22 42'30'' sul e longitude 47 38'00" oeste, e a uma altitude de 546 metros (RORIZ, 2012b). De acordo com o Censo (IBGE, 2011), a população do município era de 364.571 habitantes em 2010, e a área total compreende a 1.378,069 km²(IBGE, 2011).



Figura 8. Localização de Piracicaba no estado de São Paulo.

Segundo a classificação de *Koppen*, o clima da cidade é úmido e subtropical/Cwa (CEPAGRI, 2016) com inverno ameno e verão quente e úmido, como se vê na tabela 6 e figura 9 (RORIZ, 2012a). Nota-se que, comparando-se as duas estações, há pouca diferença entre as máximas (apenas 2°C) apresentando maiores diferenças nas temperaturas mínimas (6,5°C). Este fato indica uma característica importante da região, apontando para necessidade de resfriamento mesmo no inverno (para alguns períodos do dia), de forma que a ventilação natural deve ser considerada como estratégia de resfriamento do ar durante o ano todo, diferente de países frios onde, no inverno, é usada apenas para renovação do ar.



	Verão (°C)	Inverno (°C)
Temperatura média máxima	28.50	26.19
Temperatura média mínima	18.96	12.48
Temperatura média	23.02	18.87
Umidade relativa média	78.74	68.30

Tabela 6. Temperatura de bulbo seco e umidade relativa, médias anuais- Piracicaba; Baseado em (RORIZ, 2012a))

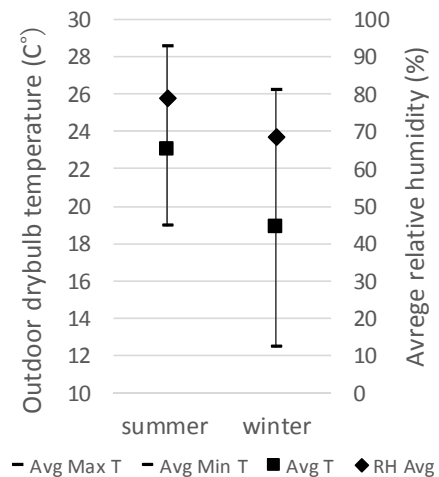


Figura 9. Caracterização do clima de Piracicaba: a- médias da temperatura de bulbo seco e umidade relativa; Baseado em RORIZ (2012a)

Nas figuras 10 e 11 é possível ver o comportamento da temperatura e umidade relativa no solstício de verão e inverno. Observa-se que o verão é mais úmido que o inverno e que os valores mais baixos de umidade ocorrem entre as 9:00h e as 15:00h, em ambas as estações, coincidindo com as maiores temperaturas. Além disso, nota-se que a máxima temperatura ocorre em torno das 13:00h e a mínima às 6:00h nos dois dias.

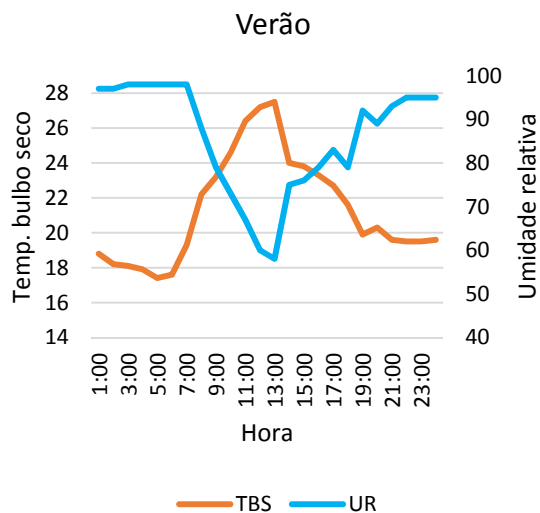


Figura 10. Variação diária da temperatura de bulbo seco e umidade relativa, solstício de verão-Piracicaba; Baseado em (RORIZ, 2012a)

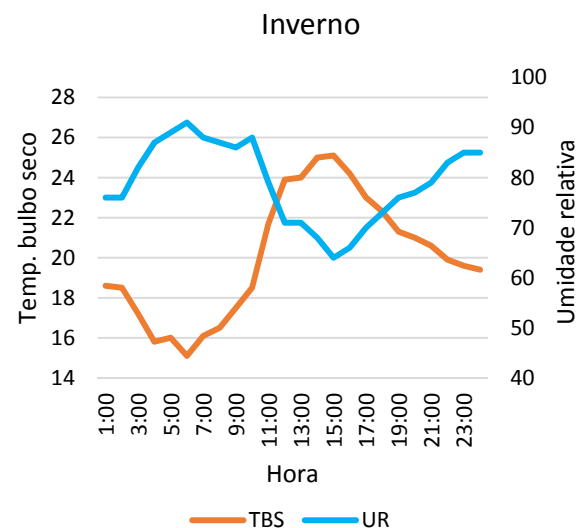


Figura 11. Variação diária da temperatura de bulbo seco e umidade relativa, solstício de inverno-Piracicaba; Baseado em (RORIZ, 2012a)



tem potencial para aplicação da ventilação natural como estratégia passiva para o resfriamento.



4 RESULTADOS

Na sequência são apresentados os resultados do estudo que foram divididos em três subitens. Para tal, adotou-se a estrutura de artigo e por este motivo o capítulo foi escrito em inglês. O conteúdo do item 4.1 foi publicado com pequenas modificações (MEDINILHA; LABAKI, 2016). Neste foram abordados parâmetros geométricos importantes para o dimensionamento de aberturas. Na sequência (4.2) avaliou-se a ventilação em um prédio de apartamentos levando em conta a predominância dos ventos e obstrução do entorno. Então no item 4.3 foi avaliado o melhor tamanho de aberturas de acordo com o comportamento térmico.



4.1 THE INFLUENCE OF SEVERAL GEOMETRIC PARAMETERS OF WINDOW SYSTEMS DESIGN IN THE NATURAL VENTILATION OF A SMALL ROOM

Around the world, energy consumption has been growing progressively and has already surpassed the population growth (PÉREZ-LOMBARD; ORTIZ; POUT, 2008), due to lifestyle and lower thermal discomfort tolerance (LAMBERTS *et al.*, 2008). Studies show that energy use will grow at higher rates in emerging economies (3.2%) than in developed countries (1.1%), and that by 2020 the former will overcome the latter in this aspect (PÉREZ-LOMBARD; ORTIZ; POUT, 2008).

In this regard, a big portion of energy use takes place at the built environment, for example in Brazil it represents 48,53% of the consumption in the country (BEN, 2016), indicating great energy savings potential. Given that building designs and constructive methods can interfere directly with natural resources consumption (LAMBERTS *et al.*, 2008), in order to avoid high energy costs it is mandatory that architects should consider passive strategies in the design process.

A valuable strategy for this purpose is natural ventilation, which contributes to air renovation for sanitary purposes, thermal comfort and decrease of the surface temperature of walls and objects (RIVERO, 1986). The natural cross ventilation also can induce a pleasant sensation while having a positive effect on thermic alliesthesia (OHBA; TSUKAMOTO; LUN, 2013), which causes a higher tolerance to hot thermal sensation (DEAR; BRAGER, 2002). For these reasons, it can contribute to the reduction of energy costs, especially in hot climates (PEREIRA *et al.*, 2013).

Nevertheless, most of ventilation standards approach only the sanitary aspect, by proposing minimal air change rate (ASHRAE, 2004; JANDA; BUSCH, 1994) or window area (ABNT, 2013b). Otherwise maximum wind speed limits (CÂNDIDO; DEAR; LAMBERTS, 2011) are suggested.

Recent research has been discussing the applicability of the minimal acceptable air movement, instead of maximum, for hot climates (CÂNDIDO; DEAR; LAMBERTS, 2011; MANU *et al.*, 2014). Table 1 shows the suggested velocity limits as a function of the temperature:



Table 1. Minimal acceptable air movement. Based on CÂNDIDO *et al.* (2011)

Indoor operative temperature (°C)	Min wind speed (m/s)
24-27	0.4
27-29	0.41–0.8
29-31	0.81

Other authors argue that ventilation regulations still require reviews and should consider thermal comfort, proposing different parameters for natural ventilation, such as:

- wind direction and speed towards the inlet window;
- opening position at the wall;
- discharge coefficient of the window;
- the proportion of the opening;
- anthermal load (CÓSTOLA, 2006).

Many of these aspects have been topics of research, such as: size (ALDAWOUD, 2016; PERSSON; ROOS; WALL, 2006); discharge coefficient (IQBAL *et al.*, 2015; P. KARAVA; T. STATHOPOULOS; ATHIENITIS, 2011; WANG, QN; GUAN; LIAO, 2014); and orientation towards prevailing wind (CÓSTOLA, 2006; LUKIANTCHUKI; CARAM, 2012; MORAIS; LABAKI, 2013a).

However, further investigation is still required in order to comprehend all parameters listed above. This research intended to evaluate the influence of various window geometry parameters (area, position, proportion and window orientation) on the natural ventilation behavior of a room. CFD (Computational Fluid Dynamics) simulation was adopted as the method to identify the most influential parameters. The performance indicators used were: the acceptability of air movement (CÂNDIDO; DEAR; LAMBERTS, 2011) and the reduction of air velocities from one case to another.

Therefore, the work provides a better understanding of these aspects and their influence on wind-driven ventilation. This knowledge can be a helpful tool to the process of windows design, contributing to the improvement of the quality of ventilation in the built environment.



4.1.1 Method

A square room (16m^2) with two opposite windows ($1\text{x}1\text{m}$) located at Piracicaba- Brazil was adopted as the base model. This model was modified by varying the size and position of the openings generating 16 new case studies. Then through CFD simulation air velocity values and velocity contours were obtained inside the room at a height of 1.20m , which is the height of the central point of the window and also represents the height of a seated person.

The mean air velocity (2.46 m/s) used as input data for the CFD simulation was extracted from the Piracicaba climate archive (RORIZ, 2012a) and it was obtained at 10m from the ground. To represent the boundary layer effect a CCL expression was inserted into the model according to (CÓSTOLA; ALUCCI, 2007) –see “Apêndice II”, so the reference speed obtained at user height was 0.92m/s .

To define the minimum air movement as proposed by CÂNDIDO et al. (2011) – see chapter 2.4- the room was considered shaded so that the air temperature could be adopted as the base. Since in Piracicaba, the summer air temperature is within the range of 27 to 29°C , it was adopted the speed of $0,6\text{m/s}$; on the other hand in winter, with a temperature range from 24 to 27°C , the adopted speed was $0,4\text{m/s}$.

4.1.1.1 Case study

The hypothetical model was defined to minimize its influence on the results. Thus, it was chosen a room with four square meters (4m^2), two openings with one square meter (1m^2), and a wind direction of 90° to the inlet window and with no obstructions, as seen in figure 1.



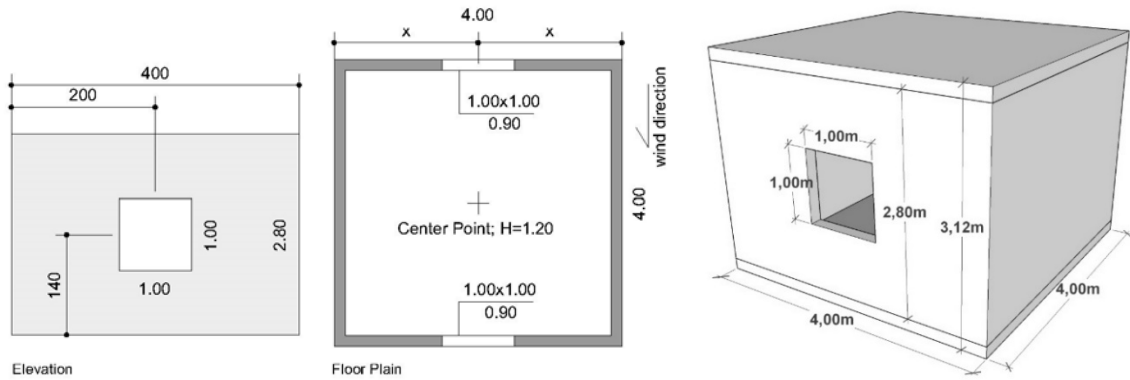


Figure 1. Elevation and floor plan of case 0.

After defining case 0, variations of this case were created to study the parameters: size, proportion, position and orientation (figure 2). For each parameter, four models were produced by varying the window symmetrically in the opposite wall, so that the inlet and outlet openings would not vary, avoiding this interference on the results. For all models, the area was maintained, except for those with varying sizes.

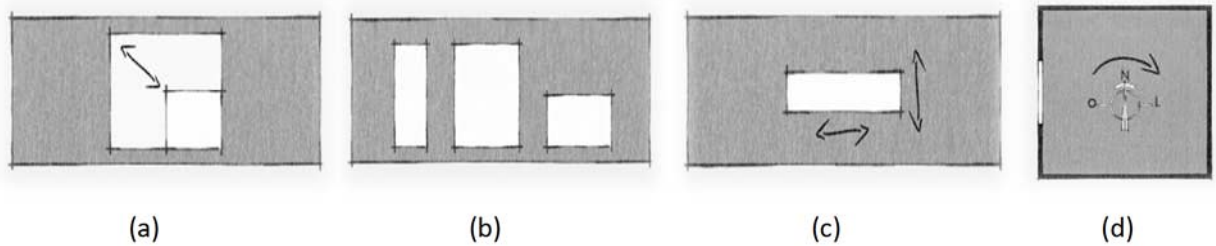


Figure 2. Studied parameters: (a) area, (b) proportion, (c) position and (d) orientation of the window



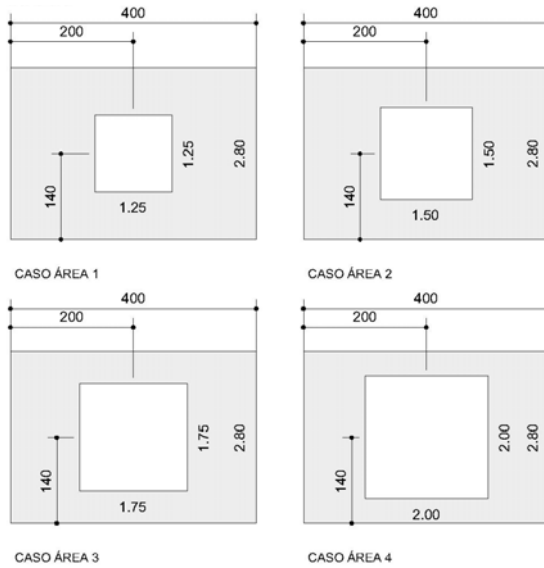


Figure 3. Elevation for the different size models.

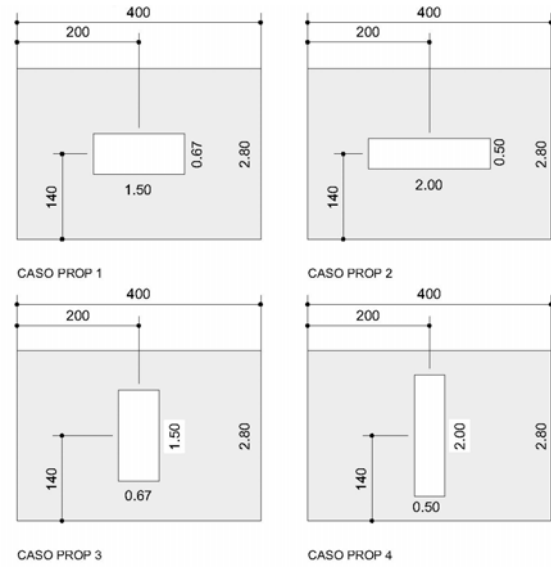


Figure 4. Elevation for the different position models.

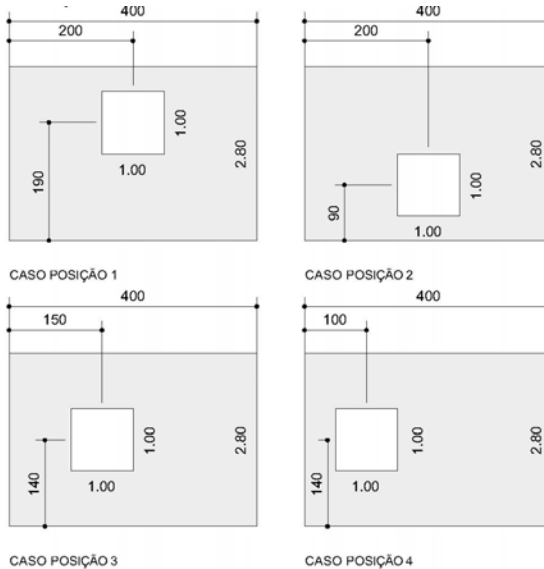


Figure 5. Elevation for the different proportion models.

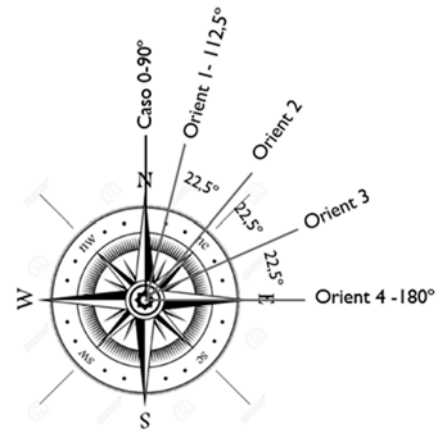


Figure 6. Wind Rose for different orientations

The size models maintained a center position on the wall increasing only the size of the windows by 0.25m for each model, as seen in figure 3. For the proportion variations, the first two models represented a horizontal shape, while the other two, the vertical form (figure 4). As for the position models, the geometry of the opening itself did not change, modifying only its location on the facade, first moving it up and down and then to the side, as seen in figure 5. Afterward, the orientation of the wind attack angle was modified by an



increase of 22.5° for each model, varying from 112.5° (case orient 1) to 180° (case orient 4) (figure 6).

4.1.1.2 CFD

The simulations were performed with CFX Ansys 16.2 (CFD software) since it has been applied successfully in several researches on building ventilations (ALDAWOUD, 2016; CÓSTOLA; ALUCCI, 2007; LUKIANTCHUKI *et al.*, 2016; MORAIS; LABAKI, 2013a; SOKHI *et al.*, 2000).

An octagonal domain (figure 7) was adopted rather than the usual rectangular one because it facilitates the simulation of diverse wind direction without sacrificing the ideal obstruction (CÓSTOLA; ALUCCI, 2007). For this domain, it is recommended a spacing of 10 to 15 times the object height, in every direction and 5 times the value for the domain height with the top blockage of 3% (COST, 2004). Following these recommendations, this research domain had 40m radius and 24m height, which resulted in an obstruction of 0.004% meeting the criteria.

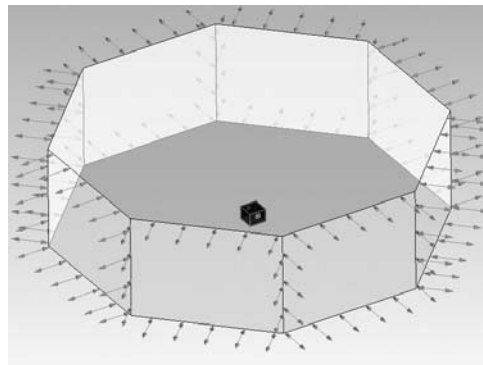


Figure 7. Octagonal domain, base model.

Mesh independence tests were performed to ensure the accuracy of the model and to define the mesh, meaning that the mesh was refined until it did not present significant changes in results. Thus, the mesh was set as tetrahedral and the global parameters were: maximum size, 1,2; face size, 0,6; and numbers of cells across the gap, 3. It was applied a program controlled inflation with a growth rate of 1.2, at the whole model; and a face sizing on the room boundaries, defining the element size as 0.10m and the same



growth rate of 1,2. The case 0 led to the total amount of 278312 nodes and 1469385 elements.

The domain configuration was established based on recent research (CÓSTOLA, 2006; MORAIS; LABAKI, 2013b): analysis type, stationary; heat transfer, isothermal at 20°C; turbulence model, k epsilon. Then, the boundary conditions were defined as: domain side walls, subsonic opening; domain top, free slip wall; domain ground and room walls– no slip wall.

The wind direction was fixed as 90° towards the inlet opening for all simulation, except at the simulations of the parameter orientation.

As recommended by several authors, the limit convergence criteria was set as maximum residual of 10^{-4} (CÓSTOLA; ALUCCI, 2007; LUKIANTCHUKI *et al.*, 2016; MORAIS; LABAKI; ROSA, 2012; PERÉN *et al.*, 2015), and the minimum and maximum iterations were fixed as 100 and 600 respectively. These configurations resulted in an average run time of 4 hours for each simulation and a total of 68 hours.

4.1.2 Results and discussion

Initially, it is presented an overview of the ventilation behavior by comparing the average wind speed for all models. Then, an individual performance evaluation is conducted by analyzing the increment on wind speed (adopting the base model as reference) and velocity contour. The last one was also used to identify the minimal acceptable air movement for summer and winter.



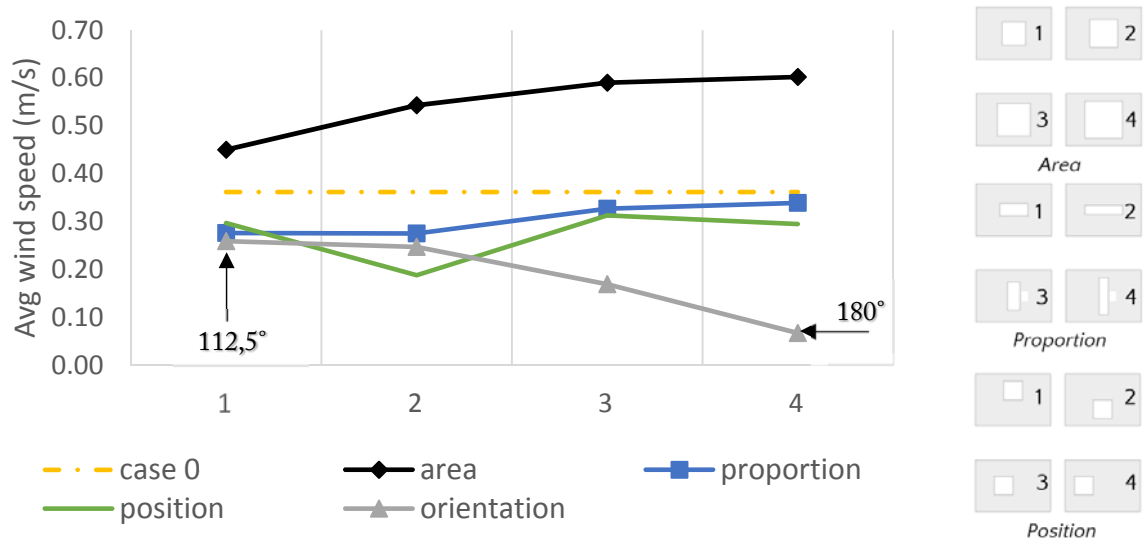


Figure 8. Average wind speed for all models.

By analyzing figure 8 it can be noted that the air movement was above the base model speed only for size models and that the orientation models show the biggest decrease. Therefore, it is possible to conclude that increasing the inlet and outlet area demonstrated to be the best strategy to improve the air speed average. As for the other cases, the average ventilation remained similar to case 0.

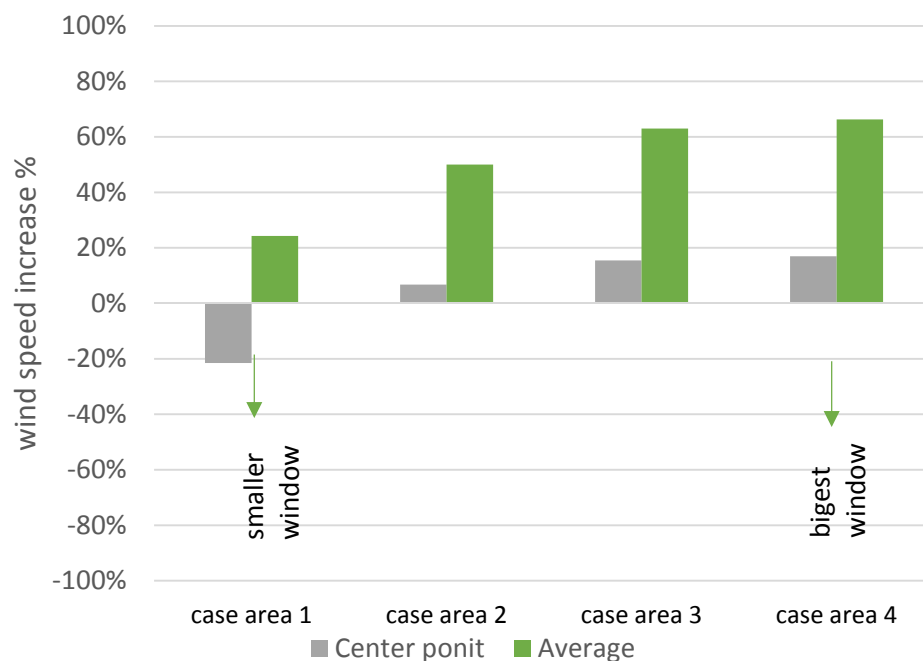


Figure 9. Increase in wind speed relative to the case 0, for size parameter models.



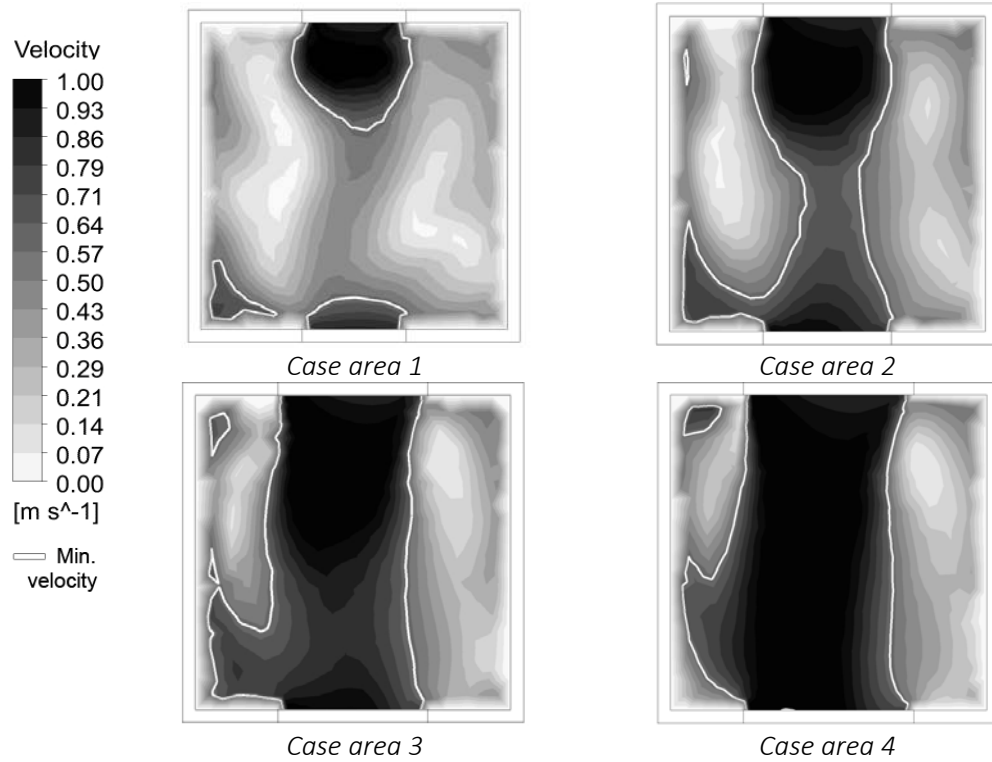


Figure 10. Velocity contour and minimum recommended air movement for summer- size series.

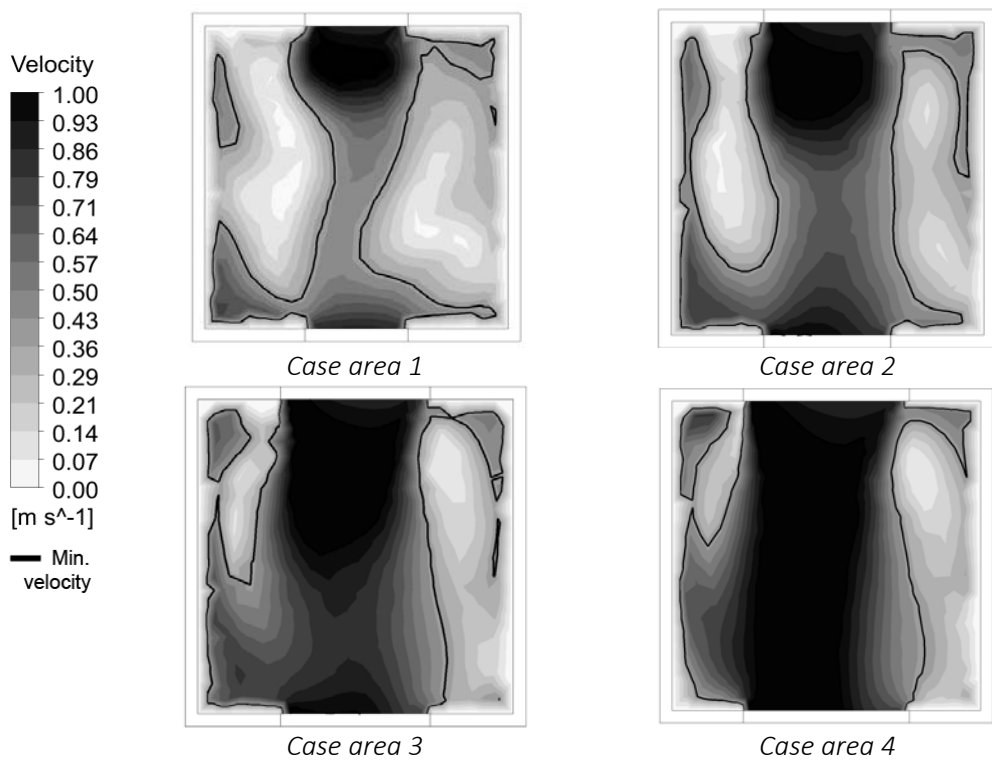


Figure 11. Velocity contour and minimum recommended air movement for winter- size series.



The analysis of the size parameter shows that as the window area increases the average wind speed also increases, as expected (figure 9). However, while the area increased by 4 times, average speed was only enhanced by 1.66 times. It is also noted that after the center point reached the inlet speed (0,92 m/s), the ventilation could not be improved even with bigger opening areas.

Figure 10 and figure 11 show the qualitative aspect of the size models. It is noted that this opening geometry provides a good homogeneity which improves, as the windows grow bigger. Summer minimal air movement is not fully achieved at any of the size models; the first model only reaches proper ventilation on the windows proximities, and even for the larger window it is not achieved at the sides of the room (figure 10). The inlet area enhancement also provides acceptable wind speed in winter (figure 11).

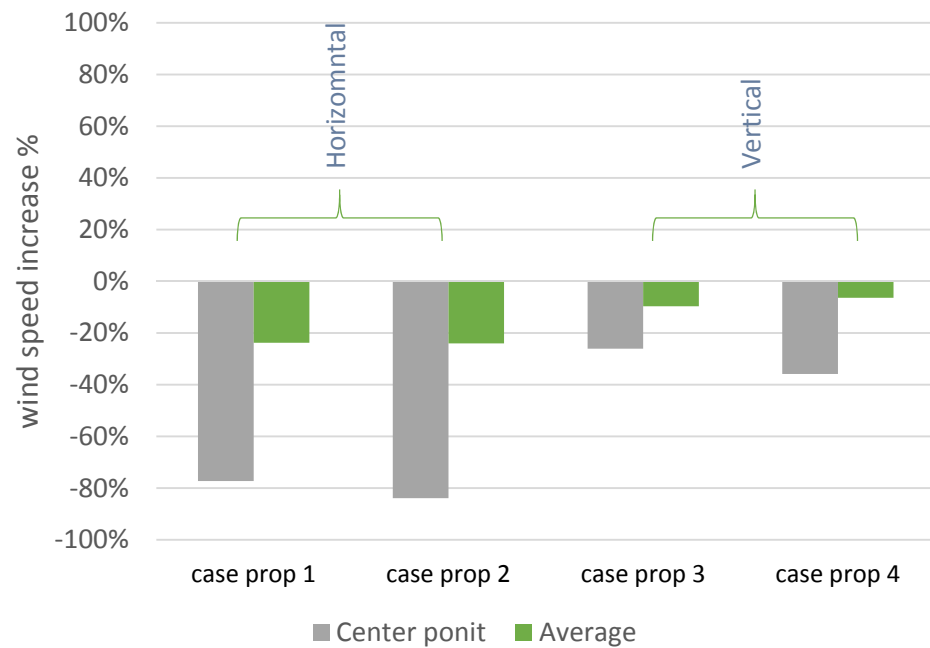


Figure 12. Increase in wind speed relative to the base model, for proportion parameter series.



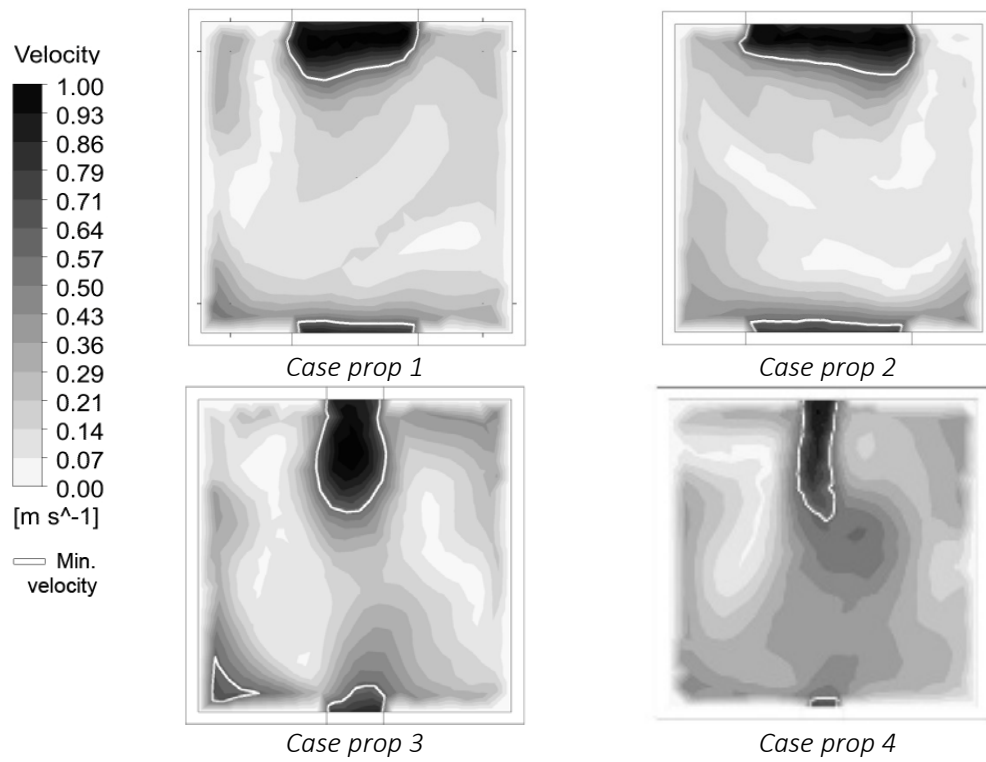


Figure 13. Velocity contour and minimum recommended air movement for summer - proportion series.

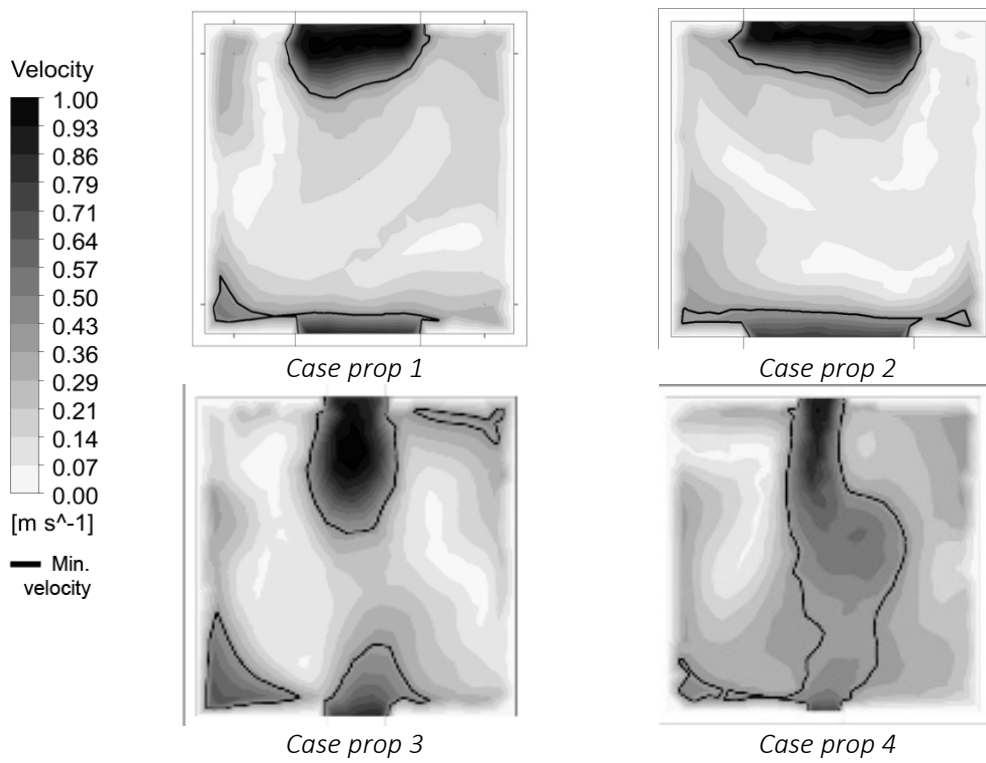


Figure 14. Velocity contour and minimum recommended air movement for winter - proportion series



Figure 12 stands for the proportion models. It shows an evident decrease on center point velocities for cases Prop 01 and 02 (-60 and -72% respectively), but there is no considerable change in the average speed, thus indicating that the horizontal shapes produce less homogeneous ventilation. In these windows, the acceptable speeds for summer are close to the inlet openings (figure 13) and for winter there is a small area near the outlet window as well (figure 14).

Vertical geometries revealed a decrease in the velocity at the center point, and an irrelevant variation in the average (figure 12), thus indicating that wider geometry performs better than slim ones.

Velocity contours, presented in figure 13 and figure 14 demonstrated that vertical openings have a narrow and centered flux displaying higher values by the windows. So the recommended air speed for summer is located only near the inlet, like for the horizontal window, but appropriate velocities are also achieved in winter through the center of the room.

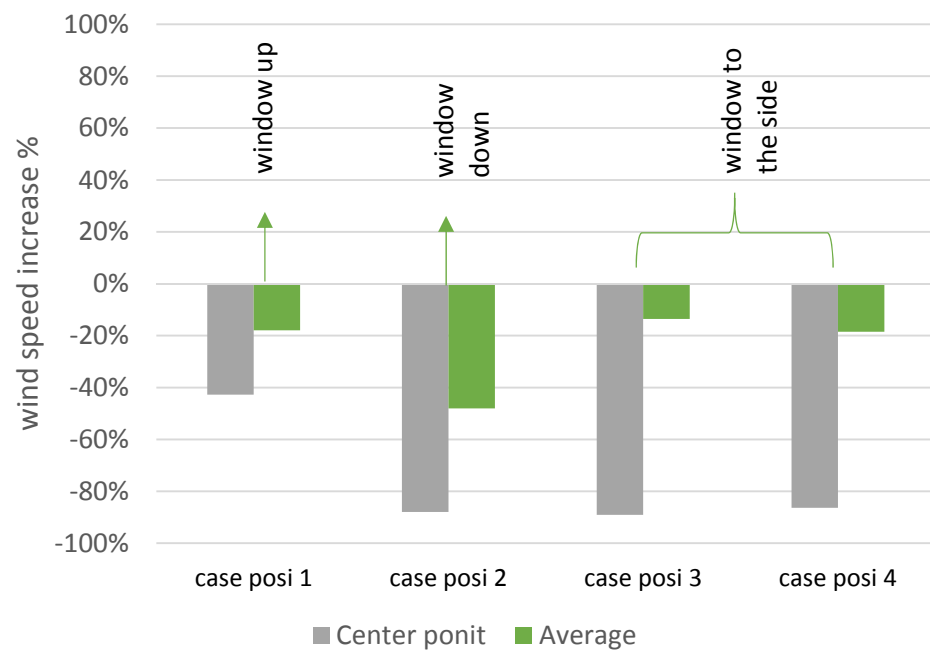


Figure 15. Increase in wind speed relative to the base model, for position parameter series



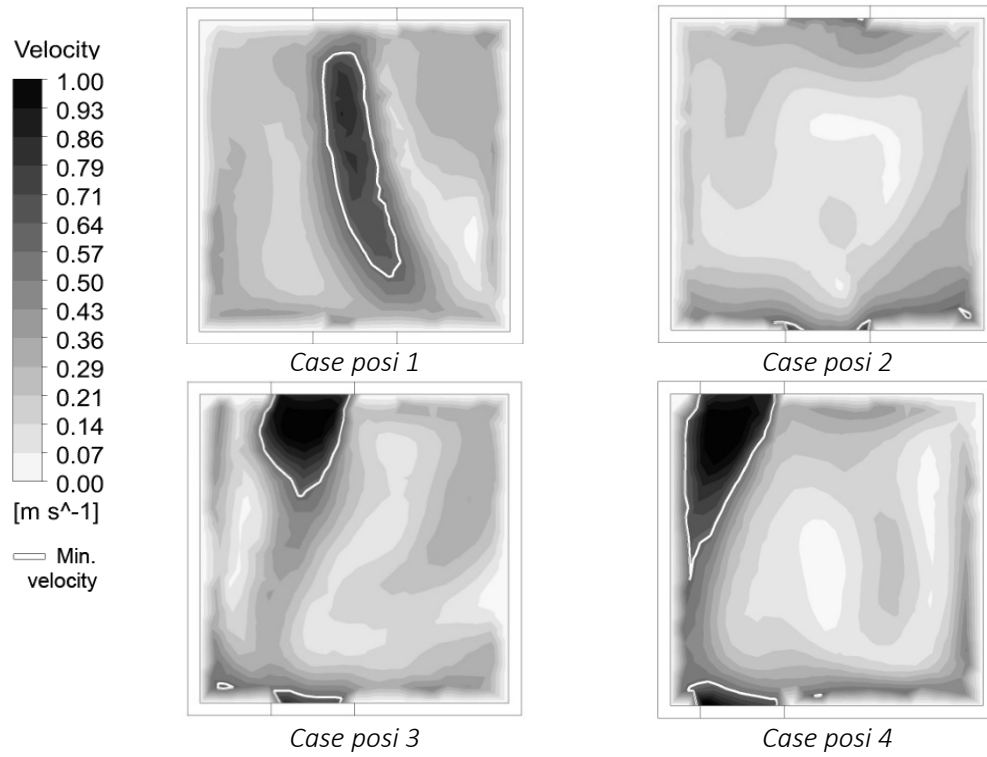


Figure 16. Velocity contour and minimum recommended air movement for summer - position series.

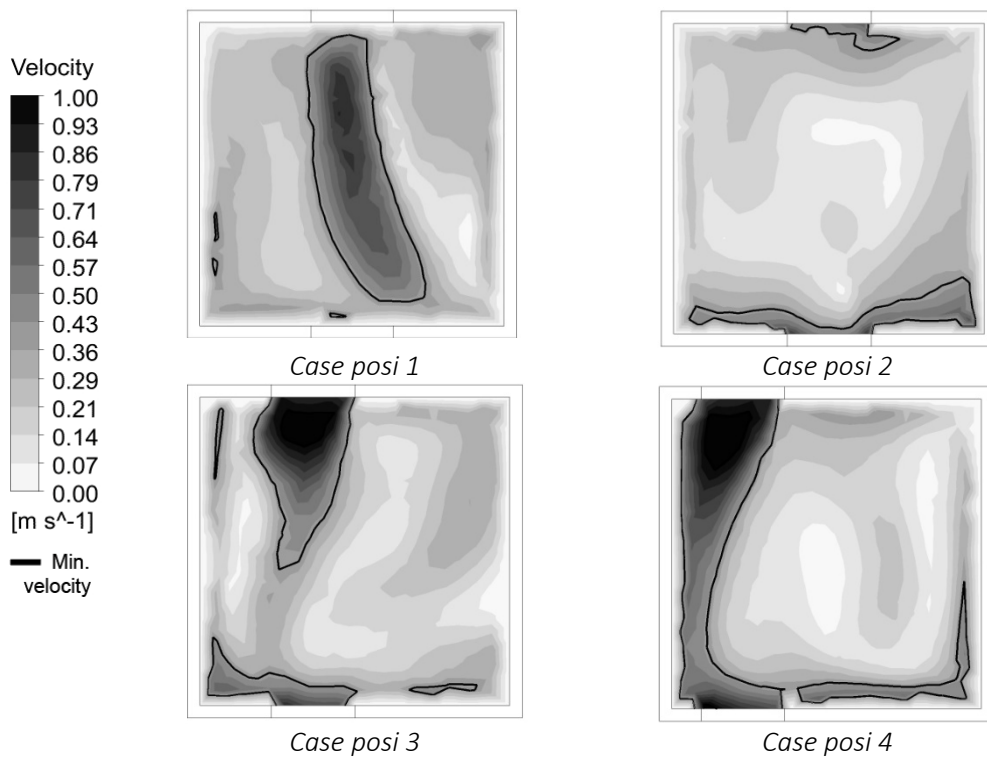


Figure 17. Velocity contour and minimum recommended air movement for winter - position series.



The first case of parameter position (window up) displayed similar ventilation behavior as compared to case 0 (figure 15). It only reaches the suggested speed in the room's center for both seasons (figure 16 e figure 17). The cases Posi 02 (window down), 3 and 4 (moved to the side) center point speed shows a reduction (figure 15). When the window was located down there was low ventilation performance (30% decrease on the average), and the air movement was below the minimum throughout the room. While for models where the window was moved to the side, in spite of a low center velocity, the average did not show representative changes, thus demonstrating that the flux, as the proper air velocity, was also moved to the same side.

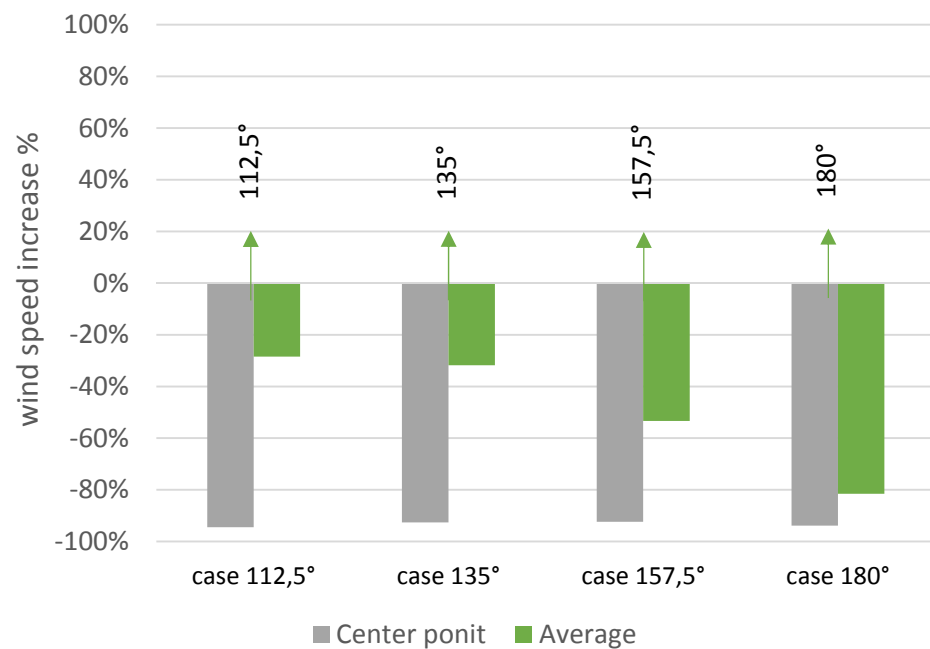


Figure 18. Increase in wind speed relative to the base model, for orientation parameter series.



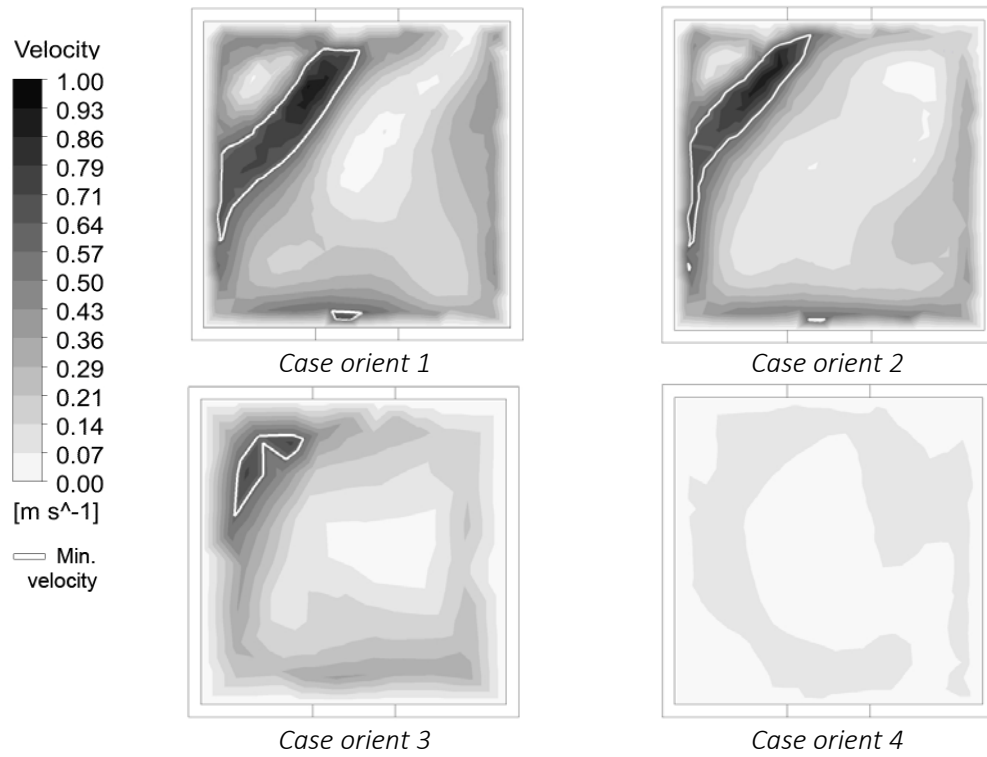


Figure 19. Velocity contour and minimum recommended air movement for summer - orientation series.

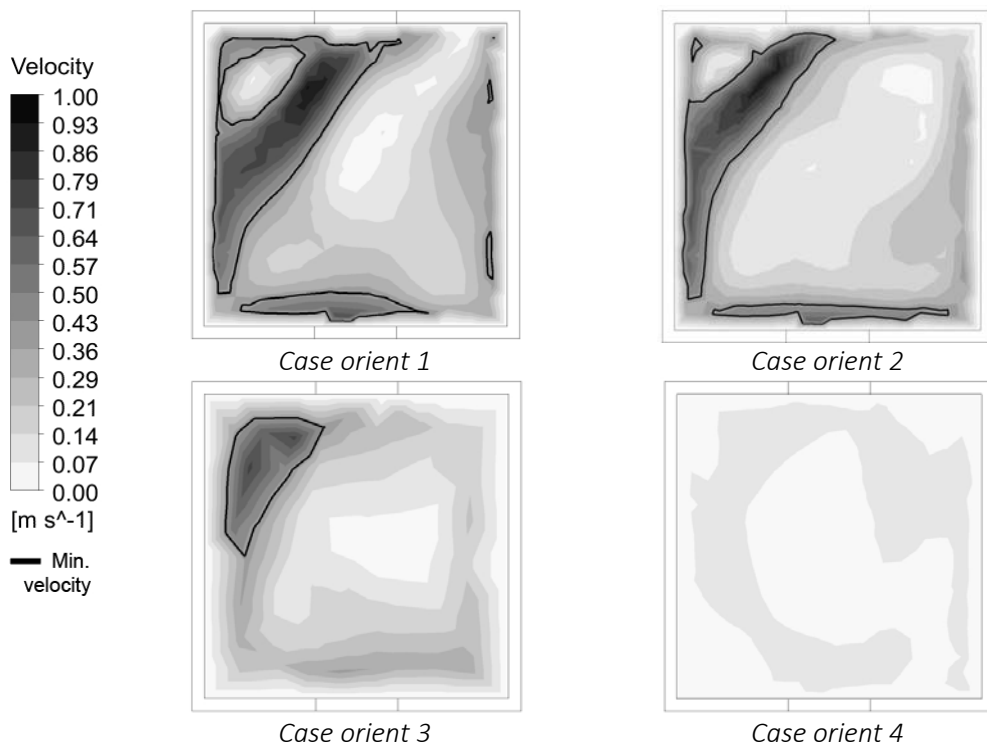


Figure 20. Velocity contour and minimum recommended air movement for winter - orientation series.



As verified by several researches (AFLAKI *et al.*, 2015; ALI; MILAD; ALI, 2007; CÓSTOLA, 2006; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014; LUKIANTCHUKI; CARAM, 2012; TOLEDO, 2006), when the wind angle towards the inlet becomes closer to 180° the average ventilation speed drops (figure 18). Nevertheless, for the speed at the center point, even a slight inclination means a significant decrease (90%). Results indicate that only angles from 90° to 135° promote proper ventilation in the room's corner in any season (figure 19 and figure 20), and show little change in the average speed. Wider angles represent significant speed reduction in general and do not achieve the recommended ventilation in most of the room.

4.1.3 Conclusion

This work intended to evaluate the influence of window geometry parameters on natural ventilation of the studied room and to identify the most relevant ones.

In this regard, it was possible to conclude that the most significant parameters were the size and orientation, showing great influence on average wind speed.

Nevertheless, while proportion and position prove to have little impact on the amount of incoming air, they influence the distribution of ventilation in the room and minimal wind speed was only partially achieved.

The results show that square windows provide a homogeneous ventilation. Also, as the window becomes more horizontal the highest velocities tend to be closer to the inlet area, while when it becomes more vertical, the flux tends to cross the room. Thus, the inlet position on the façade influences the flow position, especially because the outlet was at the same location on the opposite wall. So the lower window provided little air movement at measured high (1,20m), and for the higher window irrelevant changes in the flow were observed; when the openings were moved to the side the airflow was moved to the same side. A possibility to reduce the influence of the position on ventilation could be the placing of the outlet opening at an opposite position in relation to the inlet.



For this reason, it is important to define the position in the room where the activities will take place before making a decision regarding the window design under discussion.

In addition, windows should be positioned preferably between 45° and 135° towards the prevailing wind. If it is not possible to adopt the suggested orientation, additional active or passive measures should be predicted to ensure proper air speed, such as air pumps or solar chimneys.

Thus, natural ventilation standards should also consider the studied parameters, as their influence on wind distribution and minimal air movement availability is clear. In this matter, it is likewise important to verify that there is a limit to enhance the wind speed, because, even though the velocity of a point can be enhanced by the Venturi effect, after the average interior speed achieves the exterior reference speed the window geometry is not able to improve speed in it anymore.

Another significant fact is that the inlet area of 1m^2 was not enough to provide recommended wind speed (for the studied climate) to the entire room in any geometry or attack angle.

In conclusion, we understand that there is no ideal window geometry, but it is important to consider that different inlet shapes affect the interior airflow, and that understanding how it works is important to the design of openings.

Finally, it is important to point out that further research could explore other configurations, such as nonsymmetrical inlet and outlet, a bigger number of openings, and nonparallel position for inlet and outlet.



4.2 THE INFLUENCE OF SURROUNDINGS OBSTRUCTION ON THE AIRFLOW OF A RESIDENTIAL BUILDING

Wind driven ventilation is the most used passive strategy to remove the excess of heat load of building in tropical climates (AFLAKI et al., 2015). It is a valuable approach to achieve thermal comfort at low cost (MORAIS; LABAKI, 2013a) and therefore can contribute to energy savings (PEREIRA et al., 2013).

Nevertheless, wind driven ventilation is a complex phenomenon and airflow inside buildings can be influenced by many factors, such as the surroundings obstruction. The accelerated growth of urban areas in the recent years drew attention to the influence of urban density on airflow (BUCCOLIERI, 2011; NG et al., 2011; YUAN; NG, 2012), and recommendations have been outlined to access designers to improve wind performance in buildings (ALLARD; GHIAUS, 2005; KUANG; CHEN; SUN, 2015; MIRZAEI; HAGHIGHAT, 2012).

Researches demonstrate that the surroundings obstruction can change the direction and intensity of the winds, directly affecting the ventilation flow inside the buildings (OLIVEIRA, 2009). For example, a change of 5° in the incidence of wind can change the flow of 5% to 40% (CÓSTOLA, 2006).

Another key feature is the wind attack angle towards the building windows (ALI; MILAD; ALI, 2007; LUKIANTCHUKI; CARAM, 2012) which can represent up to 20% increase in ventilation inside building (CÓSTOLA, 2006). A research on social housing investigated three common architectural typologies in Brazil and showed that most of these building, including the H-shaped one, present ineffective wind ventilation systems. The authors indicated that few low-cost modifications would suffice to improve this situation, for example: the correct orientation in relation to wind prevailing winds, the positioning of the windows, and also the adoption of asymmetric building form (MORAIS; LABAKI, 2013a).

Although there are investigations about the influence of the surrounding obstruction to airflow, some common architectural typologies have not yet been investigated, such as the "double H" (two buildings shaped like an "H" positioned together). In this regard, this paper aims to evaluate the effect of surroundings obstruction, floor level, and wind attack angle on the airflow of a residential building configured as a "double H".



4.2.1 Method

The reference for this work is a residential building located in Piracicaba, São Paulo State (Brazil). This study considered two surrounding obstruction situations (obstructed and unobstructed) and 3 wind attack angles (0° , 45° , and 90°) resulting in 6 models. The data for this research were obtained through simulations in CFD (Computational Fluid Dynamics), by using the software CFX Ansys 16.2.

4.2.1.1 Model

For the selection of the reference building, the following conditions were considered: to be part of a social housing program, to have an usual floor plan for the considered city, and to display uniform floor plan. Therefore Parque Piazza Navona residential complex was chosen because it not only meets these criteria but was the most populated. It is composed of 23 apartment blocks (as seen in figure 21-a). The location of the building at the residential complex (highlighted in figure 21-a) was selected for being the most obstructed one. It was adopted as a reference for the simulation of the obstructed surroundings, while for the unobstructed models it was used the same building but without the surrounding.

The reference building is a four-story building configured as a "double H" (two buildings shaped like an "H" positioned together) and it forms a central courtyard limited by the stairs towers. It also presents two side recesses figure 21-b). The apartments are composed of two bedrooms (nocturnal area), a kitchen integrated to living room (diurnal area), and a bathroom (figure 22).

All windows of the building were considered of the same size (J1), except the bathroom window that is smaller (J2), as described in Table 2. The bedrooms and bathrooms have only one window, the integrated living room has two windows, as well as the corridor, see Figure 22.



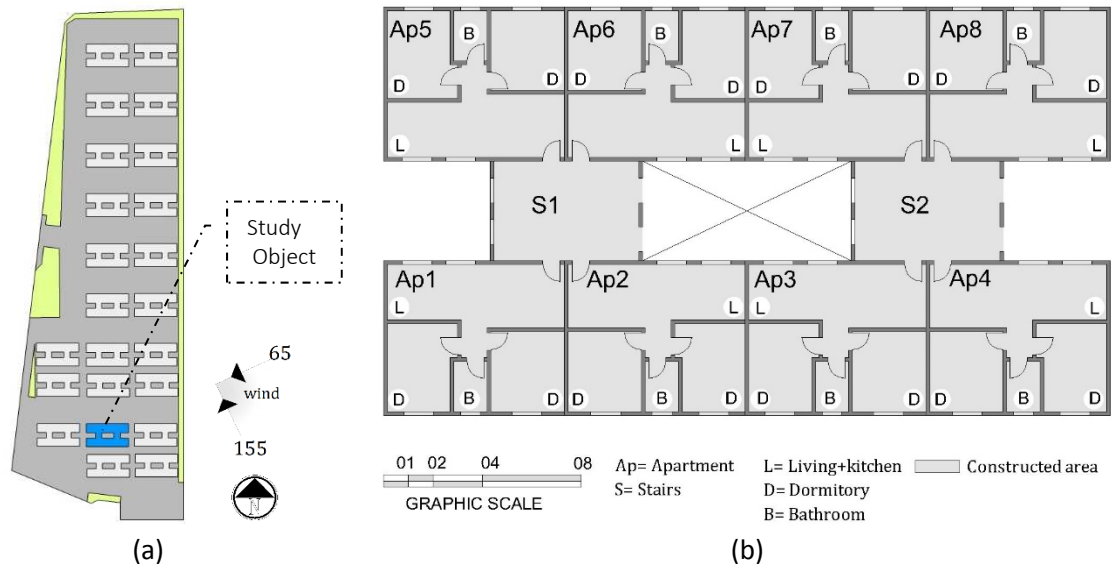


Figure 21. (a) - Location of the reference building at the residential complex; (b) - Floor plan of the Parque Piazza Navona residential complex.

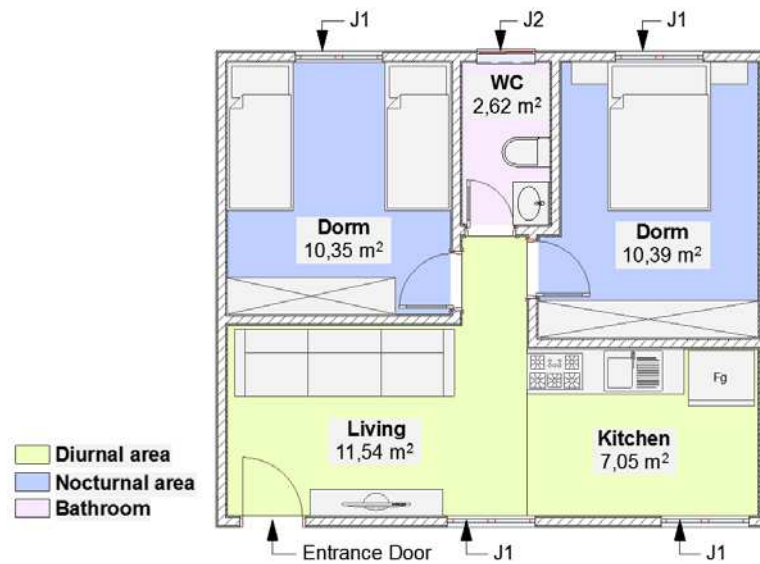


Figure 22. Floor plan of one apartment of Parque Piazza Navona.

Table 2. Description of the simulated windows and ventilation areas.

WINDOW NAME	WINDOW TYPE	N° OF PANELS	ACTUAL HEIGHT [m]	ACTUAL WIDTH [m]	TOTAL AREA [m ²]	VENTILATION HEIGHT [m]	VENTILATION WIDTH [m]	VENTILATION AREA [m ²]
J1	Sliding	2	1.00	1.20	1.20	1.00	0.60	0.60
J2	Swings open	1	0.75	0.80	0.60	0.75	0.80	0.60



4.2.1.2 Computer simulation

The study was carried out in the CFD program CFX Ansys 16.2 , which was chosen because it has been successfully applied in similar researches (CÓSTOLA; ALUCCI, 2007; LUKIANTCHUKI; CARAM, 2012; MORAIS; LABAKI, 2013a). Two sets of models (obstructed and unobstructed) were simulated for three wind incidences (0° , 45° , and 90°).

To enable the simulation of various wind attack angles it was adopted an octagonal domain with a 674,43m diameter (50 times the object height) and 77,40m height (5 times the object height), according to recommendations (CÓSTOLA; ALUCCI, 2007). This configuration resulted in a blockage of 0.009%.

In order to represent the obstructed surroundings all buildings of the residential complex were modelled (figure 23-a), but for the unobstructed surroundings only the analysed building was modelled (figure 23-b). In addition, all internal partitions of the first and last floor were modelled for the evaluated building.

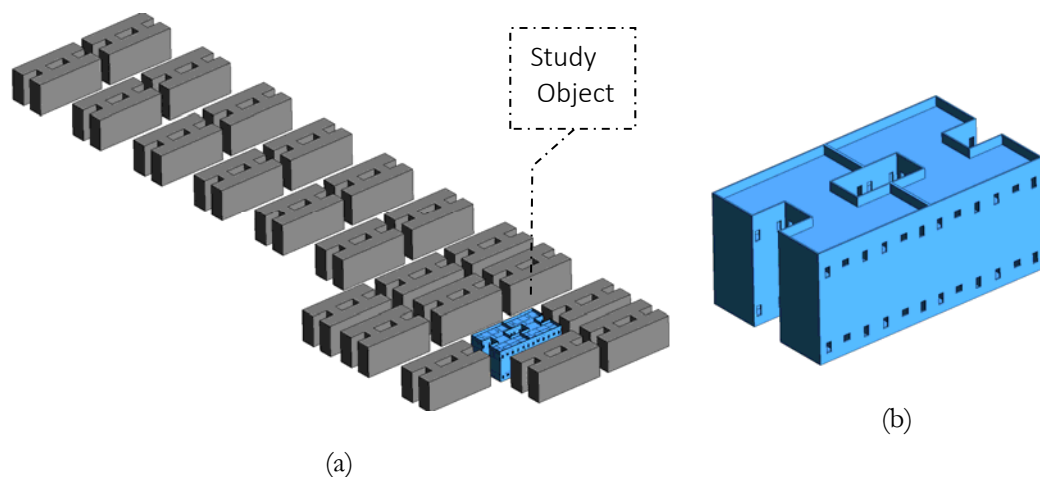


Figure 23. Model of the buildings in CFX Ansys 16.2 with obstructed and (b) unobstructed surrounding.

The average wind speed of Piracicaba at 10 m height is 2,46m/s (RORIZ, 2012b), this value was used as the reference wind speed entry for the simulations. In order to consider the boundary layer effect a CCL (Common Command Language) expression was



inserted on CFX, the profile was considered neutral, according to (CÓSTOLA; ALUCCI, 2007). After applying this correction, the resulted average inlet speed was 1,06m/s and 2,27m/s, for the first and fourth-floor window level respectively.

Mesh independence tests were performed to ensure the accuracy of the model and to define the mesh. Several simulations were carried out by refining the mesh each time. This process continued until a finer mesh did not present significant changes in results, according to other researches in the field (CÓSTOLA; ALUCCI, 2007; LUKIANTCHUKI; CARAM, 2012; MORAIS; LABAKI, 2013a). Thus, the mesh and the model's domain were configured as shown in table 3:

Table 3. Adopted configuration for CFX ANSYS 16.2 simulation.

GLOBAL PARAMETERS		DOMAIN INPUT	
SIZING		DOMAIN CONFIGURATION	
numbers of cells across gap=	3	analysis type=	stationary
face size=	2	heat transfer=	isothermal at 20°C
maximum size=	4	turbulence model=	k epsilon
growth rate=	1,2	BOUNDARY CONDITIONS	
MESH CONTROL Face sizing Local = building element size= 0.8m growth rate= 1,2		domain side walls=	subsonic opening
		domain top=	free slip wall
		domain ground and room walls=	no slip wall
		ROUGHNESS =	smooth wall
		CONVERGENCE CRITERIA	
		maximum residual =	10-4
		minimum iterations =	1
		maximum iterations =	600

4.2.2 Results and discussion

In this section, the airflow inside the first and fourth-floor apartments of the models at three wind attack angle (0°, 45°, and 90°) is presented. Initially the models are analyzed with the obstructed surrounding and then with the unobstructed one. The images of the airflow (figures from 24 to 35) show a close-up view of the studied building allowing



the analysis of its interior. In some images the wind attack angle is not clear in the close-up image due to turbulence, therefore it is indicated in the legend.

4.2.2.1 Unobstructed surrounding

By analysing the unobstructed model with wind attack of 0° (figure 24), it is clear that in the first-floor level the ventilation around the building is turbulent. In addition, the windward apartments (Ap 01-04) are well ventilated when only air velocity is considered but the air quality could be harmed: in this apartments, the living room income air flows through the bathroom, which can cause bad odours and increased humidity. For the apartments 06 and 07 (located in the courtyard) the airflow crosses the apartments 02 and 03 before it flows through them, which can also cause bad odours. This is not a constant situation because the ventilation of the leeward apartments only happens if all windows of the windward apartments are open, otherwise the airflow rate in apartments 06 and 07 can be reduced. In this model, all leeward apartments (Ap 05-08) have low wind speed, and ventilation occurs mostly due to turbulence. The ventilation on the fourth-floor level (figure 25) presents similar behaviour inside the building, but on the outside, it is less turbulent and has higher velocities.

Figure 26 shows that the apartments 02, 03, 04 and 05 are well ventilated, but in the first three rooms the airflow in the living room comes from the bathroom, which presents the same problems discussed previously. Then in the apartments 06 and 07 the income air flows across the apartments 02, 03 and the stairs towers. On the fourth-floor level (figure 27) the income velocity is higher due to the boundary limit profile and ventilation is less turbulent as compared to the first-floor. In this floor, the apartments 01 – 04 behave in a similar manner to those with wind attack angle of 0° , except for the apartment 05 that shows higher velocities and presents acceptable performance.

By observing the wind attack angle of 90° (figure 28 and figure 29), we can see at the first-floor the exterior ventilation is turbulent; then, at the fourth-floor, it is more stable and with higher velocities. In both floor levels only apartments 01 and 05 show good ventilation.



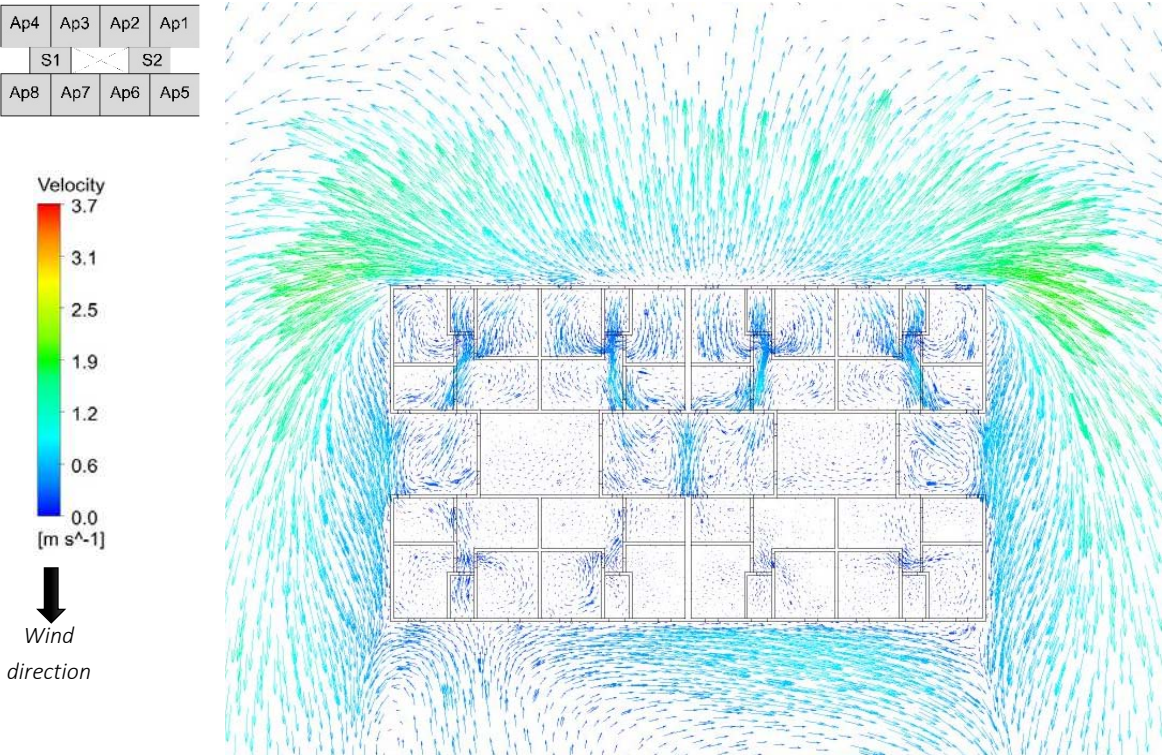


Figure 24. Airflow of the first-floor apartments at wind attack angle of 0°, unobstructed surrounding.

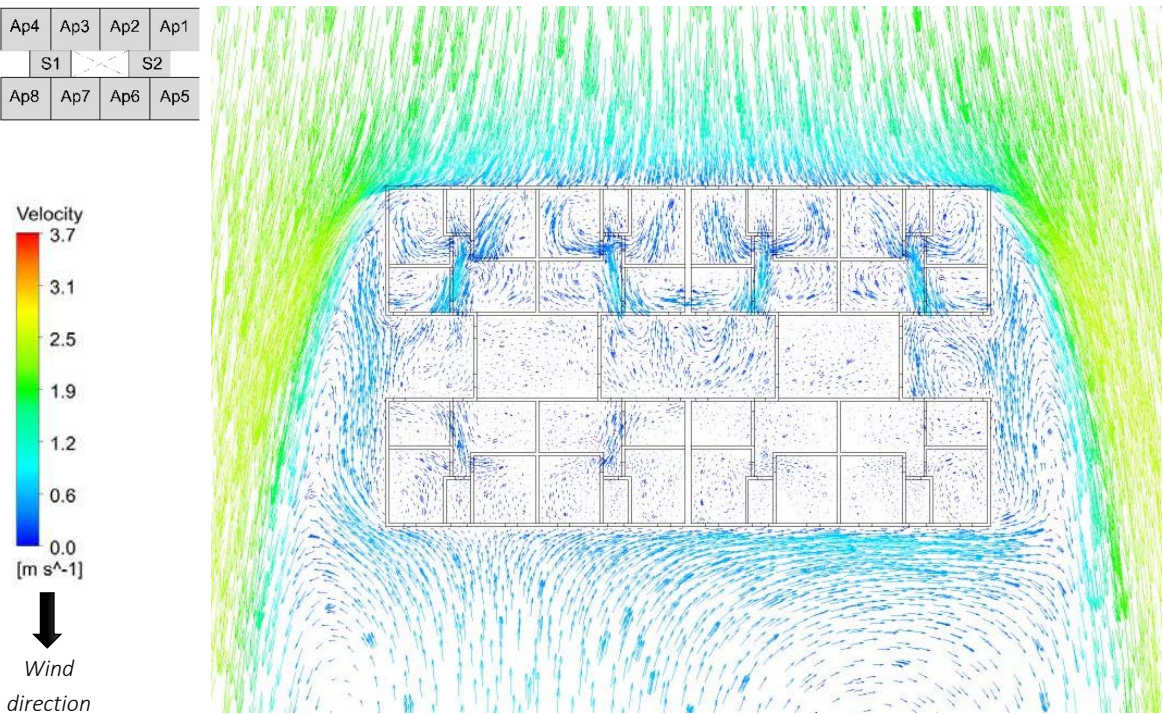


Figure 25. Airflow of the fourth-floor apartments at wind attack angle of 0°, unobstructed surrounding.



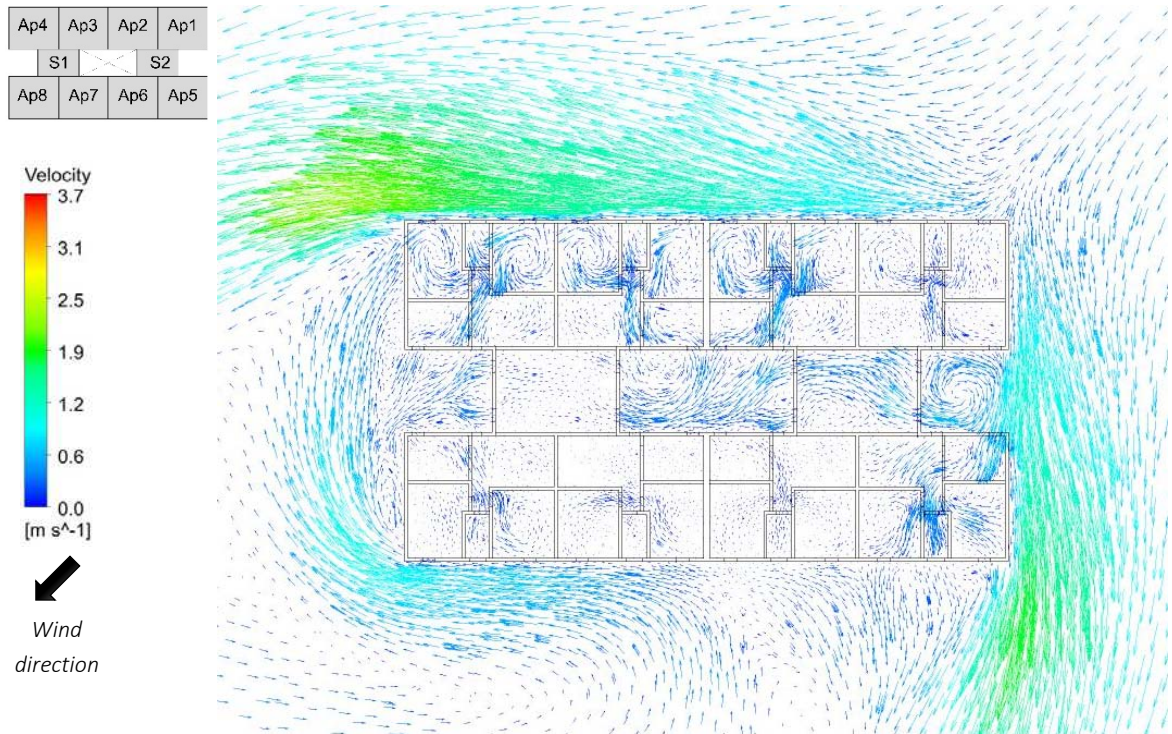


Figure 26. Airflow of the first-floor apartments at wind attack angle of 45°, unobstructed surrounding.

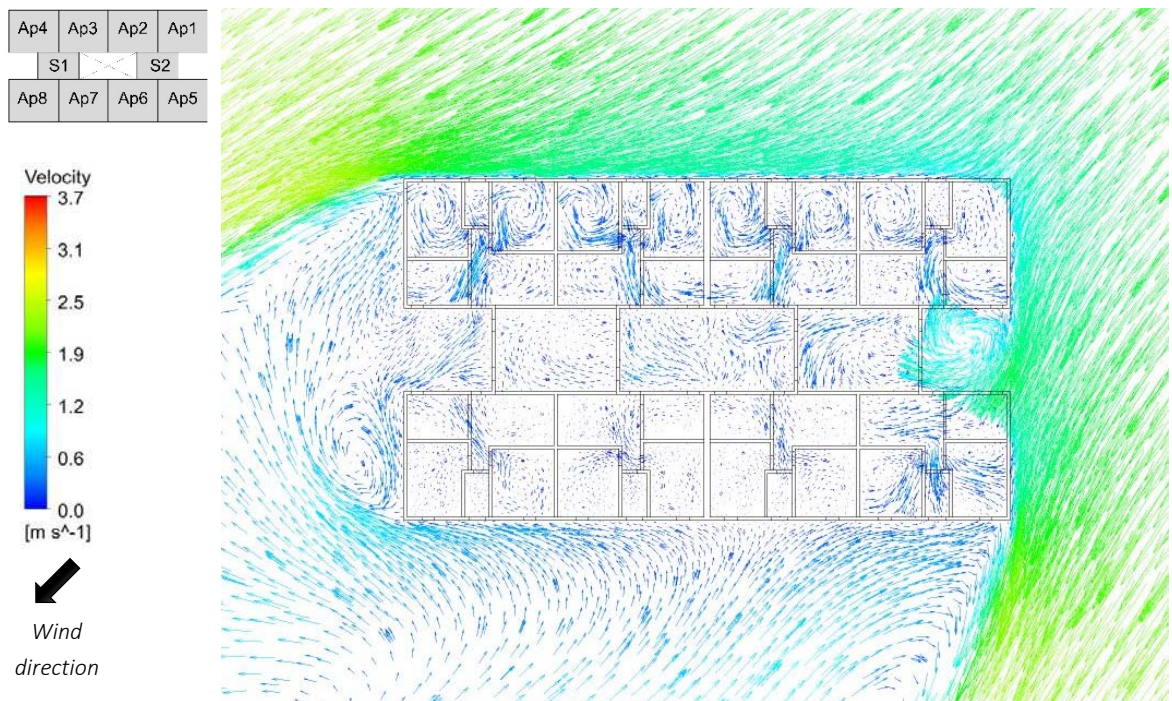


Figure 27. Airflow of the fourth-floor apartments at wind attack angle of 45°, unobstructed surrounding.



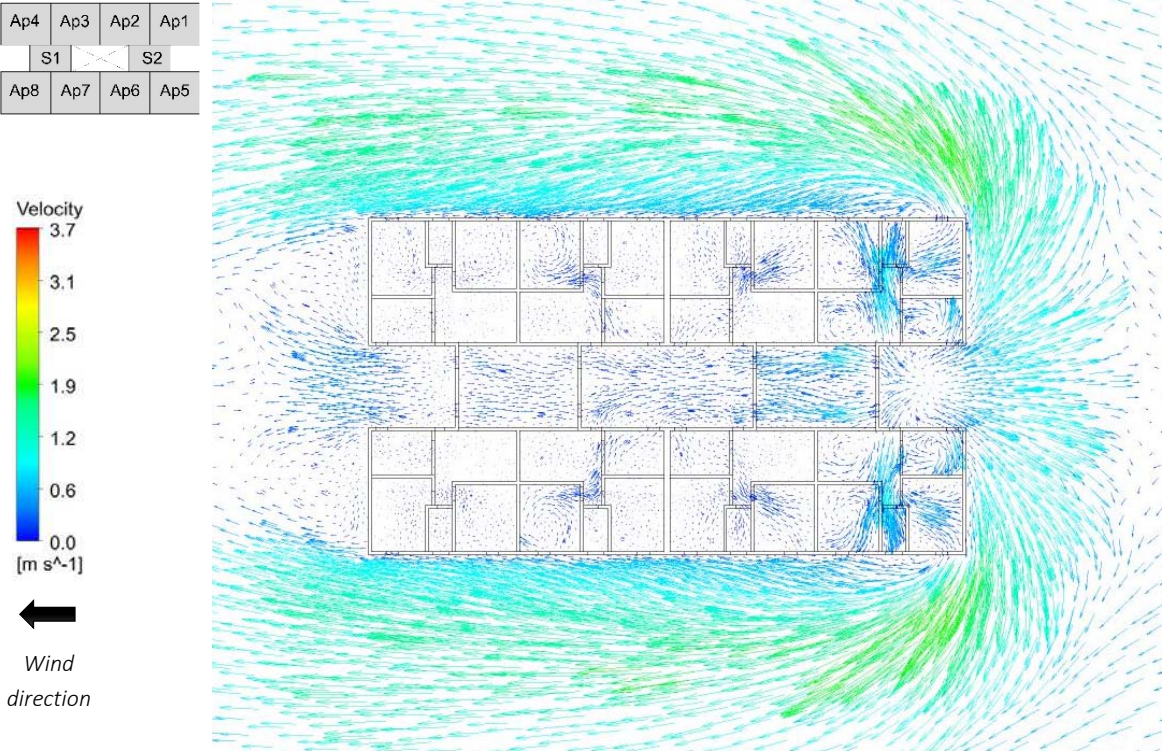


Figure 28. Airflow of the first-floor apartments at wind attack angle of 90°, unobstructed surrounding.

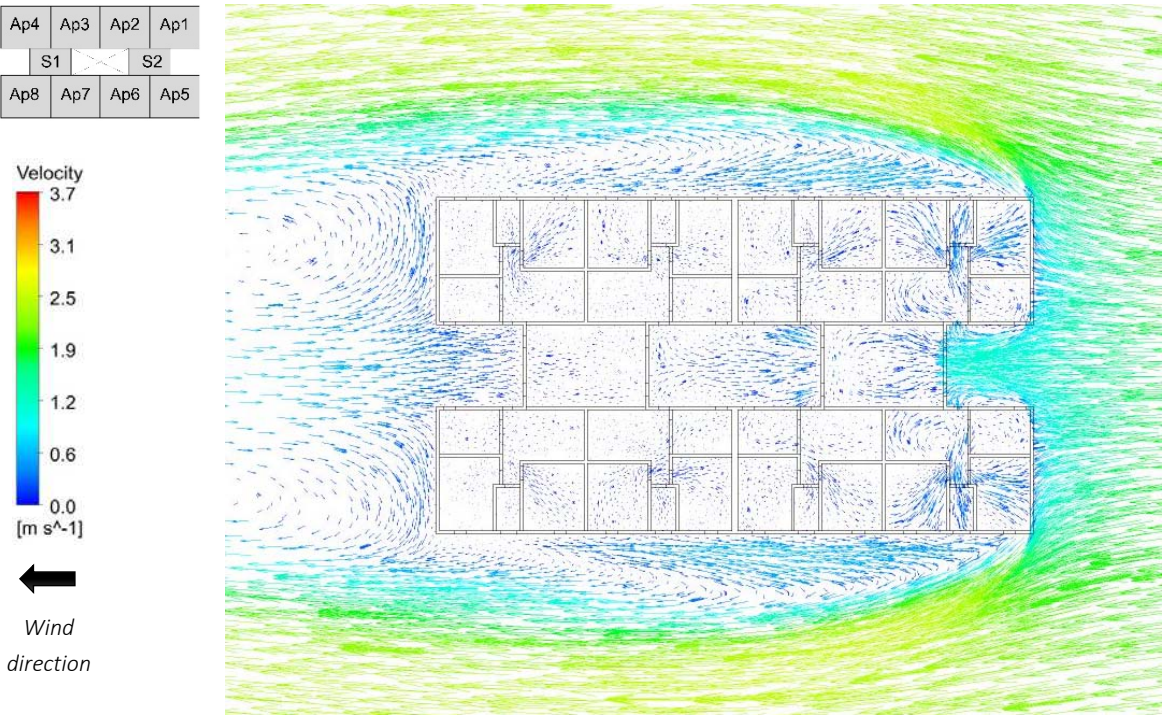


Figure 29. Airflow of the first-floor apartments at wind attack angle of 90°, unobstructed surrounding.



4.2.2.2 Obstructed surrounding

Figure 30 shows the first-floor of the obstructed model with wind attack of 0° . In this situation, the wind around the building changes direction due to the obstructions. The wind is tangent to the apartments 01 to 04 and for this reason the ventilation is due to suction with adequate speed, but turbulent. Moreover, the air quality is compromised because it flows through the bathroom before arriving at the living room. Apartments 05 to 08 have similar behaviour to the unobstructed ones at the same wind attack angle, presenting low air speed. At the fourth-floor (figure 31), the wind surrounding the building has higher speed, but the airflow behaviour in the apartments is very similar to the ones on the first-floor.

The model with wind attack angle of 45° (figure 32 and figure 33) show a small difference between the first and the fourth-floor. The ventilation is not turbulent and the wind direction does not change considerably. The apartments have low air speed, the first-floor presenting the higher values.

Figure 34 presents the results of first-floor level at a wind angle of 90° : the wind direction undergoes the influence of the obstruction and the flow is similar to that with 45° wind incidence, but with lower velocities. Then at the fourth-floor level (figure 35), the wind direction is not influenced by the obstructions and speed is higher. However, the apartment on both levels shows the same airflow behaviour. Since the first-floor level has low-income airspeed and at the fourth-floor the flow is tangent to the windows, all rooms present poor ventilation.



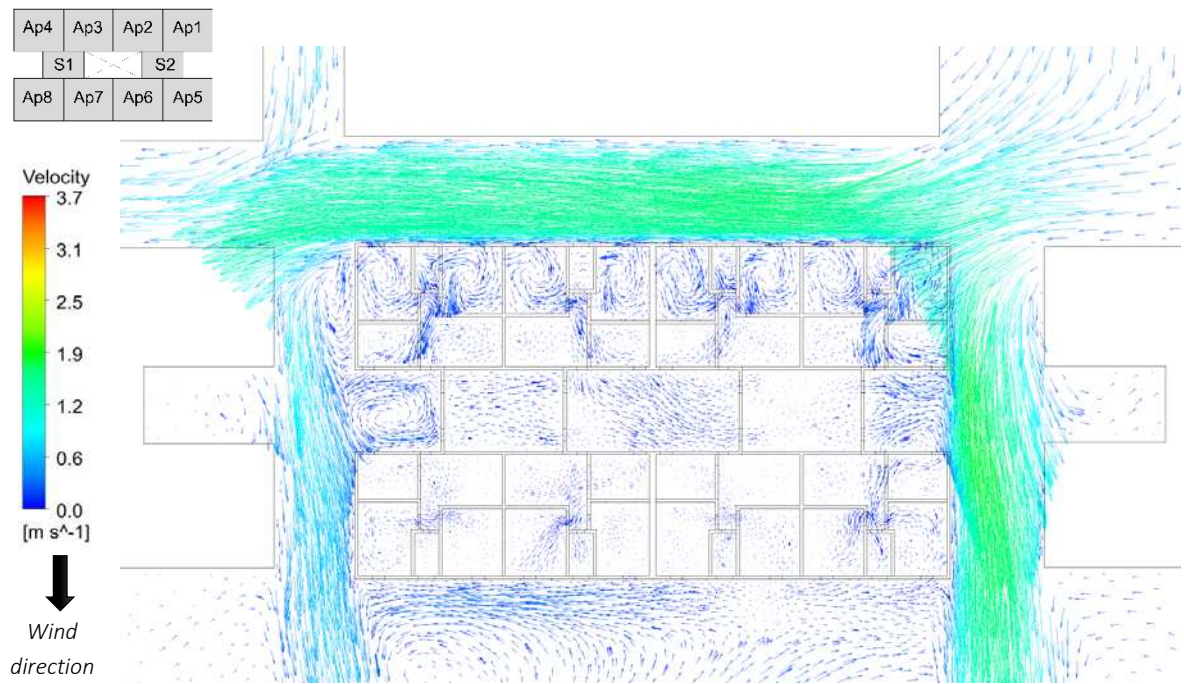


Figure 30. Airflow of the first-floor apartments at wind attack angle of 0°, obstructed surrounding.

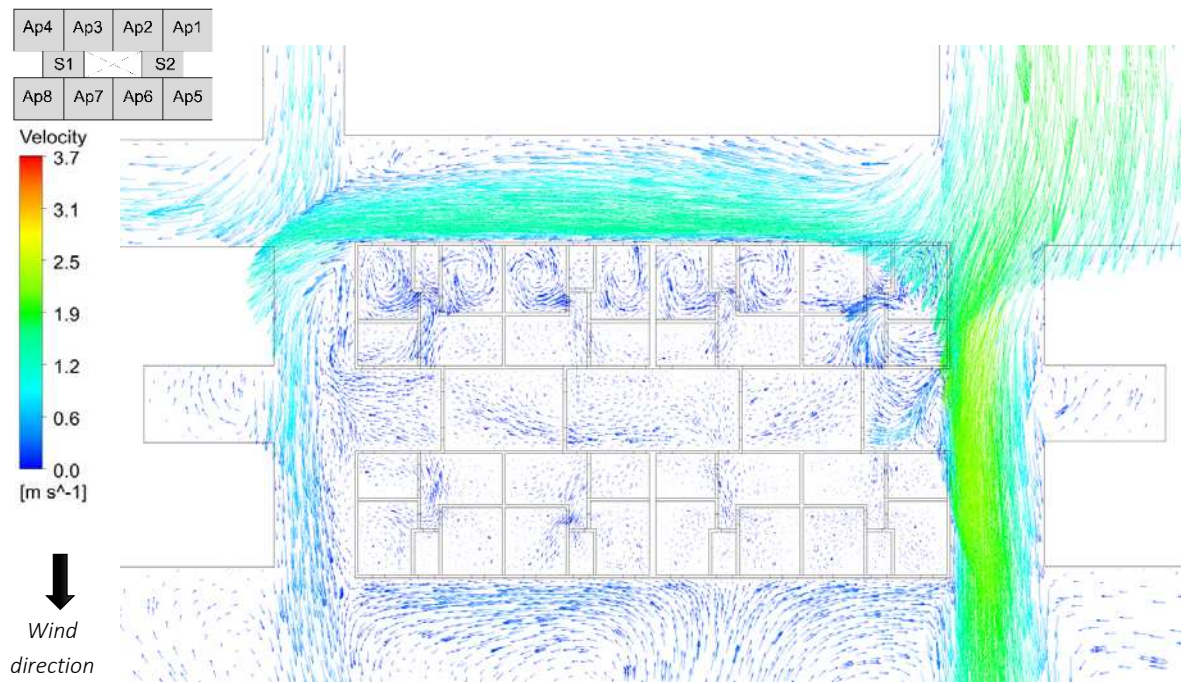


Figure 31. Airflow of the fourth-floor apartments at wind attack angle of 0°, obstructed surrounding.



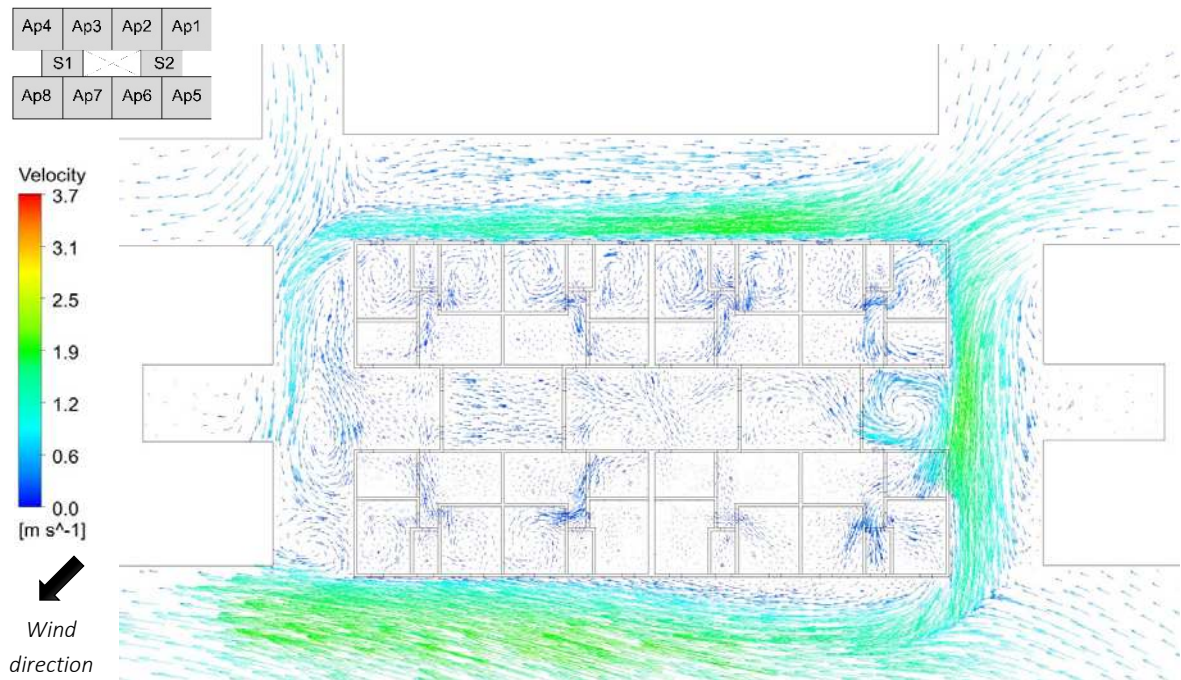


Figure 32. Airflow of the first-floor apartments at wind attack angle of 45°, obstructed surrounding.

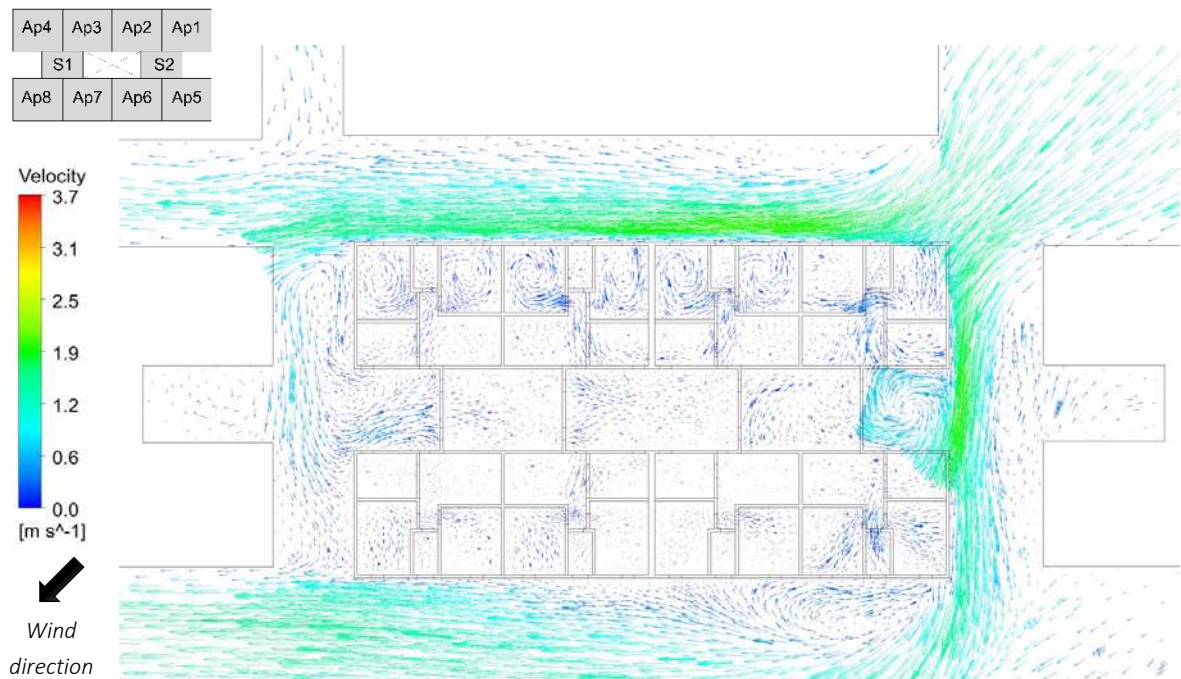


Figure 33. Airflow of the fourth-floor apartments at wind attack angle of 45°, obstructed surrounding.



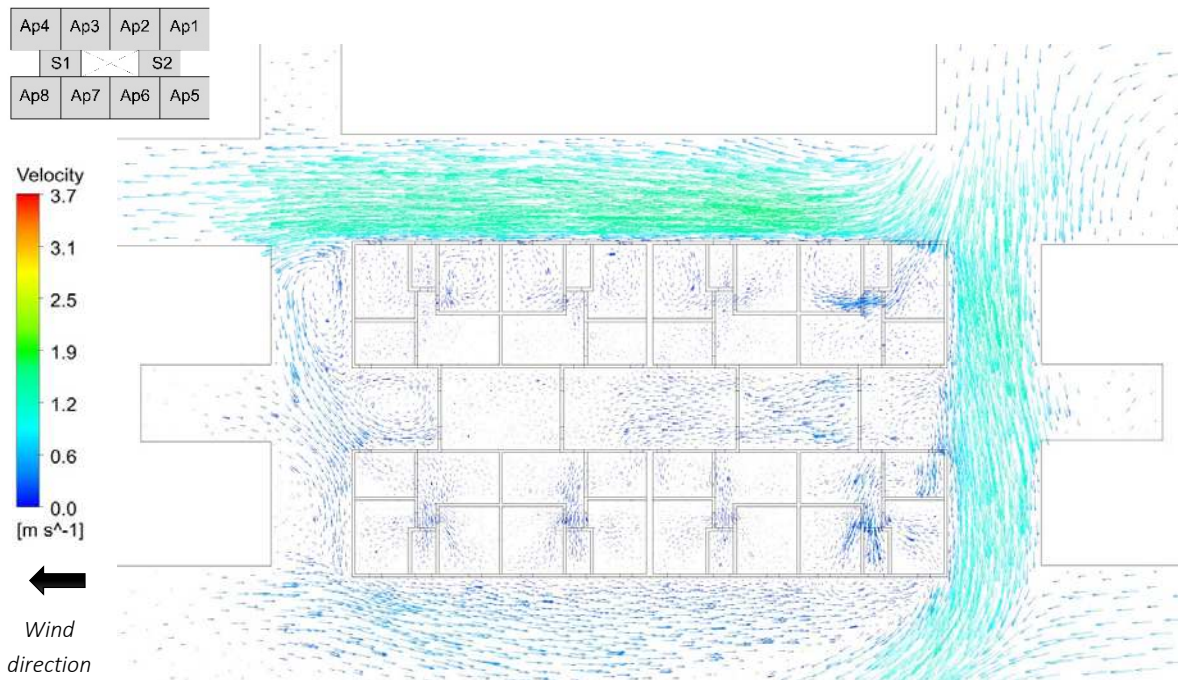


Figure 34. Airflow of the first-floor apartments at wind attack angle of 90°, obstructed surrounding.

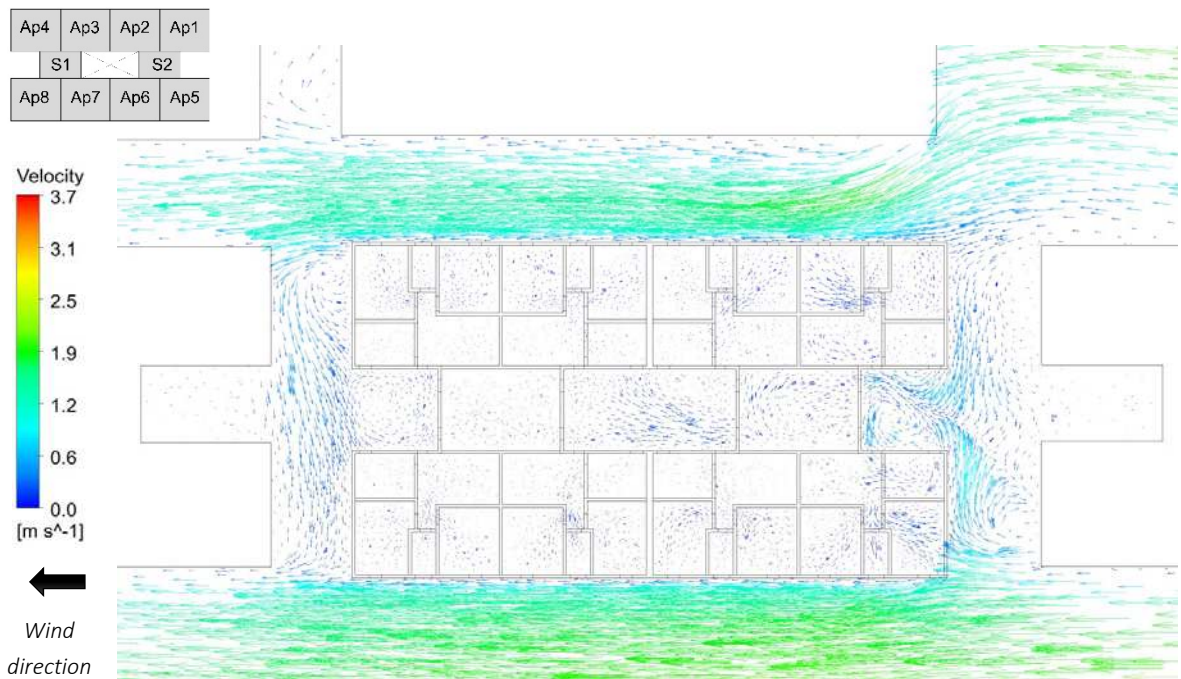


Figure 35. Airflow of the first-floor apartments at wind attack angle of 90°, obstructed surrounding.



4.2.3 Conclusion

This study addressed the issue of airflow quality on a residential building configured as a "double H", focusing on the effect of surroundings obstruction, wind attack angle and floor level.

The analysis of the airflow around the buildings with unobstructed surroundings indicates that the wind attack angle does not influence the velocity of the income air, but influences the airflow and the turbulence levels. In addition, the floor level has a strong influence on the income velocity due to the boundary limit profile.

In relation to the income airflow, it is noted that when the airflow is tangent to the windows the ventilation inside the rooms is insufficient. Apartments with windows at leeward also do not achieve good ventilation.

For these reasons, the "double H" shape building are not well ventilated in all apartments, independent of wind attack angle, surroundings obstruction or floor level. This leads to conclude that different options of building shapes should be considered, such as leaving a space between the two "H". This strategy prevents the airflow from crossing the neighbour's apartments before arriving at the apartment located leeward on the courtyard; also it would provide better air circulation.

Another issue identified is that in some cases the income air in the living room and kitchen comes from the bathroom, bringing undesired odours. A solution in these cases could be to mirror the apartments position by always placing the living room and the kitchen windows at the windward position.

The findings of this work can contribute to the quality of the built environment in the country, since it evaluates a recurrent format in residential buildings in Brazil, indicating solutions to the identified problems. In this way, it gives subsidy for the design of new buildings with proper ventilation.



4.3 BEST WINDOWS SIZES FOR DIFFERENT SURROUNDING OBSTRUCTION AND ORIENTATION IN A WIND DRIVEN VENTILATED BUILDING BASED ON THERMAL PERFORMANCE

Design taking advantage of the wind driven ventilation is a recommended strategy to reduce energy consumption in buildings (GIVONI, 1992; LAMBERTS *et al.*, 2008; RIVERO, 1986). Nevertheless, to make proper use of this resource it is required an advanced knowledge in the field and time-consuming simulations. Thus, to allow greater applicability of this resource guidelines that simplify the process of dimensioning wind driven ventilation systems, as well as to approach the most relevant factors for natural ventilation are necessary. Such factors are the topography, the wind direction and velocity, the heat load, the proportion and shape of the building and window, the orientation, position in floor plan, type and area of the windows (CÓSTOLA; ALUCCI, 2007; LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014; TOLEDO, 2006).

The current standards adopt a simplified approach to the topic, imposing a minimum number of air exchanges per hour, minimum ventilation area, or maximum air speed (AFLAKI *et al.*, 2015; CANDIDO *et al.*, 2010). These standards does not cover all the important aspects mentioned before and requires further study.

In addition to the standards, some researchers also address this issue by proposing methods for ventilation systems dimensioning for one face of a room (KHEMLANI, 1995; SUGA; KATO; HIYAMA, 2010), or hybrid ventilation and lighting systems in office buildings (RUPP; GHISI, 2012), and different buildings proportion (INANICI; DEMIRBILEK, 2000).

Other authors focus on the investigation of important parameters that indirectly lead to windows systems dimensioning guidance. The most investigated parameter in this regard is the WWR (window to wall ratio), which is mostly appropriated to evaluate its impact on the overheating, so that just a few researches explore the relation between the WWR and wind driven ventilation.

Zmeureanu (1988) relates WWR to the cost benefit of various types of thermal insulation and considers natural ventilation in the Montreal climate. Another case study



evaluated air quality, thermal, acoustic, and visual comfort, in Nigerian hospitals (STEPHEN NIMLYAT; ZIN KANDAR; SEDIADI, 2015). Also, in Turkey, the ideal WWR for atrium and courtyards was analyzed (TABESH; SERTYESILISIK, 2016).

Although there is a discussion about some aspects of the windows design, it is noted that there are still some important factors related to natural ventilation that are not addressed, indicating the need for researches especially in the residential field.

In this regard, we investigated the ideal windows sizes for a low-rise building with wind driven ventilation considering different building surroundings obstruction and orientations. The evaluated parameters are based on the previous research presented in item 4.1, and are consistent with the scale of the models. A list of all parameters evaluated is presented: window area, the position of the windows on the floor plan, distance from the ground, building surroundings obstruction and orientation. The building thermal performance was adopted to evaluate the best windows systems, as recommended on Brazilian standard NBR 15220 (ABNT, 2005) instead of the wind speed.

Therefore, this study aims to contribute to reducing the deficit of information about sizing windows for the residential environment.

4.3.1 Method

The reference for this work is a residential building located in Piracicaba, São Paulo State (Brazil). It was therefore modified by varying the area of the windows, building surroundings obstruction and orientation. The data for this research were obtained through simulations, which occurred in two steps: the first one in CFD to obtain the pressure coefficients of the windows and then this information was fed to Energy Plus to perform the thermal simulation.

The use of Energy Plus coupled with CFD improves the results accuracy because it allows considering different wind directions and intensity, building's heat load, surrounding obstruction and orientation. This work did not consider proportions and different shapes of the building and windows, neither windows discharge coefficient or terrain topography.



The city climate is described as humid subtropical - Köppen classification system (CEPAGRI, 2016). The average humidity is higher than 70% through all year; the maximum average temperature in summer is 28,50°C and in winter 26,19°C, the average minimum in summer is 18,96°C and in winter 12,48°C (RORIZ, 2012a), which shows that even in winter high temperatures are observed, therefore ventilation is needed throughout the year.

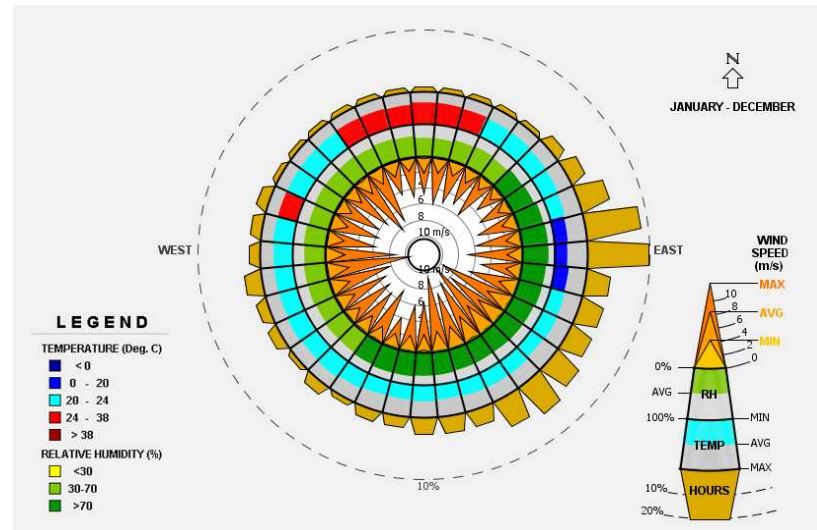


Figure 36. Rose of winds for Piracicaba. Source: Climate Consultant (MILNE, 2016)

The wind speed varies from 4,80 to 0,44 m/s with an average of 2,46m/s (value used as the reference wind speed entry for the simulations). These data were extracted from Piracicaba climate archive (RORIZ, 2012b) which were obtained at 10m above ground. In order to consider the boundary layer effect a CCL (Common Command Language) expression (CÓSTOLA; ALUCCI, 2007) was inserted on CFX, the profile was considered neutral. After applying this correction, the resulted average inlet speed value were 1,06m/s and 2,27m/s, for the first and fourth-floor window level respectively. In addition, for Piracicaba, the wind prevailing direction is from 65° to 155°, as seen in figure 36.



4.3.1.1 Model

For the selection of the reference building, the following conditions were considered: to have participated in a social housing program, to have an usual floor plan for the studied city, and to display uniform floor plan. Therefore Parque Piazza Navona residential complex was chosen not only because it meets those criteria but also it was the most populated. It is composed of 23 apartment blocks (as seen in figure 37-a). The location of the building at the residential complex (highlighted in figure 37-a) was selected for being the most obstructed one. This position was adopted as a reference for the simulation with obstructed surroundings, while for the unobstructed models it was used the same building without the surrounding.

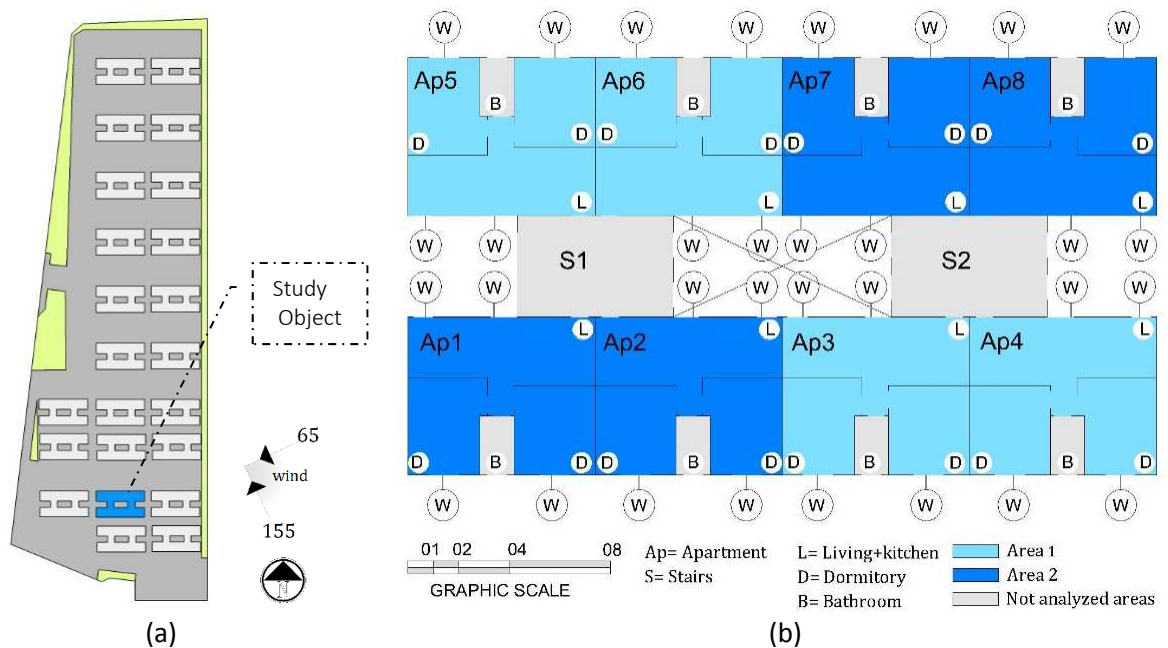


Figure 37. (a) - Location of the reference building at the residential complex; (b) - Floor plan of the Parque Piazza Navona residential complex.



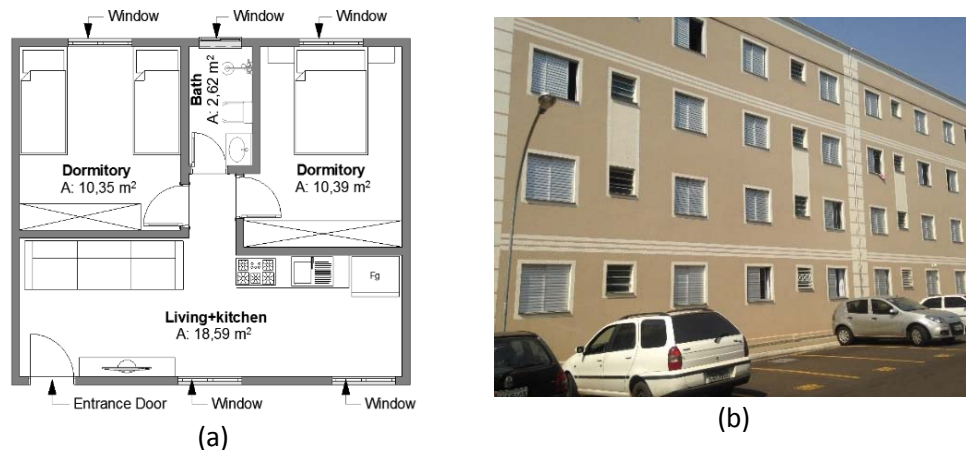


Figure 38. (a) - Floor plan of one apartment; (b) - external view of Parque Piazza Navona residential complex.

The reference case is a four-story building with typical materials and painted in light colors (figure 38-b). As seen in the floor plan, shown in figure 37-b, the building is configured as a "double H" (two buildings shaped like an "H" positioned together) so that it forms a central courtyard and two side recesses. The apartments are composed of two bedrooms, a bathroom and a kitchen integrated to the living room (figure 38-a).

The presentation of the results is organized in two sections (4.3.2.1-Surroundings obstruction and 4.3.2.2-Orientation). In the first session it was analyzed area 1 and in the second section areas 1 and 2 (see figure 37-b and table 4). All rooms of the apartments were simulated except for the bathroom since it is of low relevance for thermal comfort.

Table 4. Description of the analyzed areas

Section	Analyzed area
4.3.2.1-Surroundings obstruction	Area 1°
4.3.2.2-Orientation	Area 1 and 2°

4.3.1.2 Parametric variation

To determine the windows sizes to be tested, a calculation of window minimum (30% of the floor area) and maximum (60% of the floor area) area was performed by applying the current Brazilian standards (ABNT, 2005, 2013b) to the apartments. These values were based on existing Commercial Brazilian windows, therefore it was adopted the range from 0.6 to 4.0 m². The selected sizes are shown in table 6 and figure 39. Windows J60, J120 and



J160 are the most common and inexpensive ones. In addition, the cases suffered variation on the parameters: surroundings obstruction, orientation and window area as described in table 5, generating 30 case studies.

Table 5. Description of the simulated models

SURROUNDINGS OBSTRUCTION	ORIENTATIONS	WINDOW TESTED	NUMBER OF SIMULATIONS
obstructed	0°, 45°, 90°, and 135°	J60, J120, J160, J260, J330, and J400	24
unobstructed	0°	J60, J120, J160, J260, J330, and J400	6

Table 6. Description of the simulated windows and ventilation areas.

NAME	N° OF SLIDING PANELS	ACTUAL HEIGHT [m]	ACTUAL WIDTH [m]	TOTAL AREA [m ²]	VENTILATION HEIGHT [m]	VENTILATION WIDTH [m]	VENTILATION AREA [m ²]
J60	2	1.00	1.20	1.20	1.00	0.60	0.60
J120	2	1.20	2.00	2.40	1.20	1.00	1.20
J160	3	1.20	2.00	2.40	1.20	1.33	1.60
J260	3	1.50	2.60	3.90	1.50	1.73	2.60
J330	3	1.65	3.00	4.95	1.65	2.00	3.30
J400	3	2.00	3.00	6.00	2.00	2.00	4.00

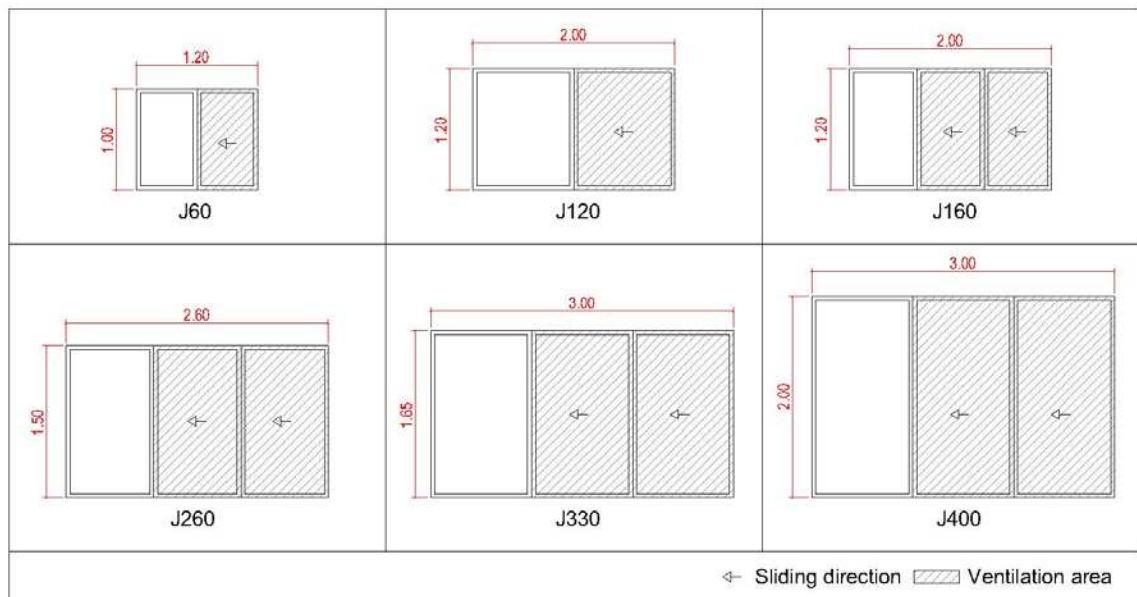


Figure 39. Geometric scheme of the simulated windows and ventilation areas.



4.3.1.3 Computer simulation

For computer simulations, two software were used: CFX Ansys 16.2 (CFD simulation) and the Energy Plus 8.4 (energy simulation). The settings are described as follows:

CFX

Two sets of models (obstructed and unobstructed) were simulated for different wind incidences. Thus, eight simulations were carried out for each set (unobstructed and obstructed) by rotating the wind attack angle every 45° , starting from 0° up to 315° .

In order to obtain the pressure coefficients, 16 simulations were performed with the software CFX Ansys 16.2 for different wind incidences and obstructions (further input to the software Energy Plus). The simulations were carried out by rotating the wind attack angle every 45° , starting from 0° up to 315° . To represent the obstructed surroundings all buildings of the residential complex were modeled and for the unobstructed surroundings only the analyzed building. All internal partitions for the first and last floor (evaluated floors in the study) were modeled. Therefore, 64 pressure coefficients were extracted from each model, considering the central point of each window present in the studied rooms (identified with a "W" in figure 37-b).

To enable the simulation of various wind attack angles it was adopted an octagonal domain with a 674,43m diameter (50 times the object height) and 77,40m height (5 times the object height), according to the recommendations of (CÓSTOLA; ALUCCI, 2007). This configuration resulted in a blockage of 0.009%.

Mesh independence tests were performed to ensure the accuracy of the model and to define the mesh. Several simulations were carried out by refining the mesh each time, This process continued until a finer mesh did not present significant changes in results, as proceeded in other rehearses in the field (CÓSTOLA; ALUCCI, 2007; LUKIANTCHUKI; CARAM, 2012; MORAIS; LABAKI, 2013a). Thus, the mesh and the model's domain were configured as shown in table 7:



Table 7. Adopted configuration for CFX ANSYS 16.2 simulation.

GLOBAL PARAMETERS		DOMAIN INPUT	
SIZING		DOMAIN CONFIGURATION	
numbers of cells across gap=	3	analysis type=	stationary
face size=	2	heat transfer=	isothermal at 20°C
maximum size=	4	turbulence model=	k epsilon
growth rate=	1,2	BOUNDARY CONDITIONS	
MESH CONTROL Face sizing Local = building element size= 0.8m growth rate= 1,2		domain side walls= subsonic opening	
		domain top= free slip wall	
		domain ground and room walls= no slip wall	
		ROUGHNESS = smooth wall	
		CONVERGENCE CRITERIA	
		maximum residual = 10-4	
		minimum iterations = 1	
		maximum iterations = 600	

Energy Plus

The models were constructed in SketchUp with the aid of OpenStudio plugin. The construction materials of the models were based on the actual case (listed in table 8), and the internal loads were established following recommendations (PEREIRA *et al.*, 2013), see table 9.

Table 8. Materials used to compose the Energy Plus model.

	LAYER 1	THICKNESS [M]	LAYER 2	THICKNESS [M]	LAYER 3	THICKNESS [M]	TOTAL TRANSMITTANCE [W/M2K]	ABSORPTANCE
Exterior Wall	Mortar	0,025	Concrete block	0,09x0,19x0,39			2,78	0,6
Interior Wall	Mortar	0,025	Ceramic block	0,09x0,14x0,24	Mortar	0,025	2,46	0,6
Slab	Concrete	0,14	x	x	x	x	2,7	0,3

Table 9. Internal loads used to configure the Energy Plus model.

TYPE OF LOAD	AMOUNT	UNIT
People	4	
Lighting	10.6	W/m ²
Electric equipment	3.9	W/m ²



Due to symmetry, it was possible to reduce the numbers of simulations by varying the orientation only at one-quarter of the circle (0° , 45° , 90° , and 135°). “Shading” objects were used to represent the surrounding’s obstruction. The wind obstruction was already considered at CFD.

Natural ventilation was simulated in all studied apartments (see figure 37) using the object Airflow Network, with simulation control "Multizone Without Distribution", and pressure coefficients extracted from the CFD model. The maximum number of iterations was equal to 500 according to recommendations (PEREIRA *et al.*, 2013). The windows were considered always open in order to understand the full potential to mitigate thermal discomfort through natural ventilation in different models.

4.3.2 Results and discussion

This study adopted as performance indicator the Adaptive Comfort Degree-Days (for overheating) (MCGILLIGAN; NATARAJAN; NIKOLOPOULOU, 2011), which is calculated as the difference between the operative temperature and the adaptive comfort model of temperature for hot thermal sensation. This method allows to evaluate the intensity of discomfort throughout the day (NICO-RODRIGUES *et al.*, 2015); and is a well-known method for naturally ventilated environments.

The results are organized in two sections, the first one analyzing the building surroundings obstruction and then evaluating the building orientations as follows:

4.3.2.1 Surroundings obstruction

In this section, it was analyzed the obstructed and unobstructed models at orientation 0° , and in order to simplify data manipulation, we considered only apartments 01, 02, 07, 08 at both first and fourth-floor (see figure 37-b).

Figure 40 presents the average operative temperatures of the apartments with different window sizes and surrounding obstructions. The apartments with unobstructed surrounding (figure 40-a) have a wider range of temperatures than those with obstructed



surrounding figure 40-b). In addition, it can be observed that the temperature of apartments with window J400 are higher than the others. This happens because on the obstructed surrounding models the studied building is shaded by the neighboring ones and the interior air speed is reduced due to the obstructions (as discussed in item 4.2).

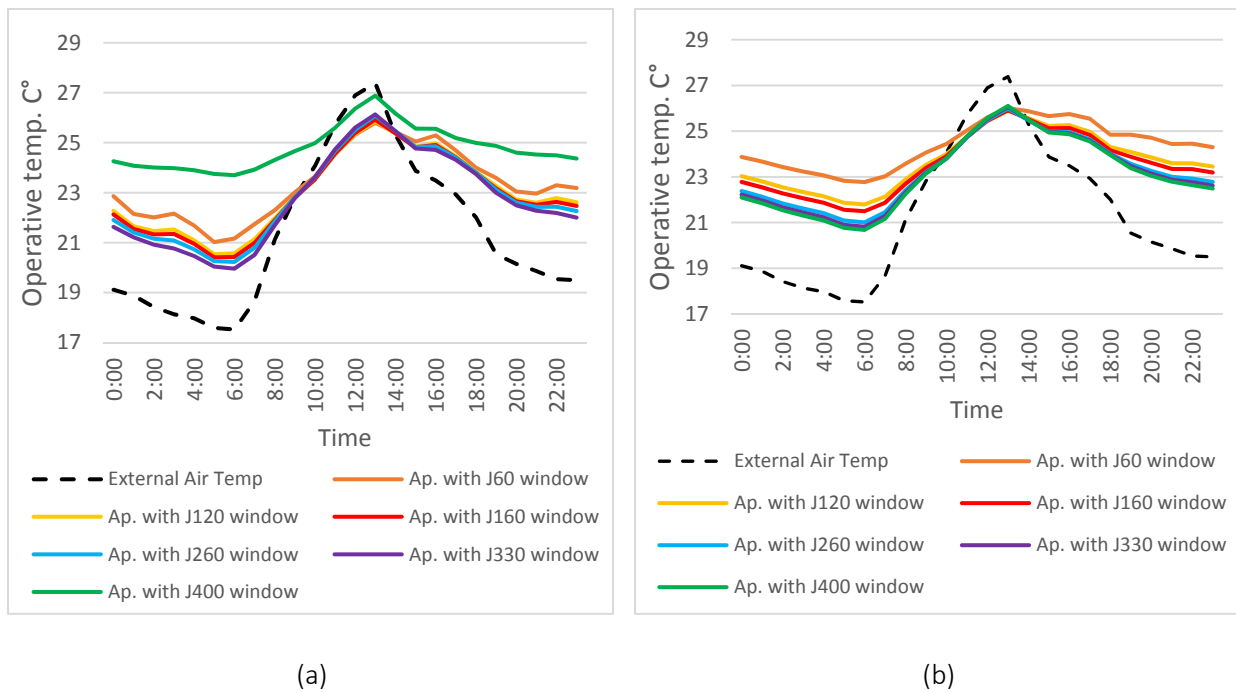


Figure 40. Daily variation of the operative temperature in apartments with different window sizes, on the summer solstice. (a) unobstructed and (b) obstructed surrounding.

The analysis shown in table 11 and table 12 presents the best and the second best window sizes, which means the models with the lowest values of Degree Days of Thermal Discomfort by Heat. Also, these results are classified by size, as follows: 0,60 to 1,20 m²- small; 2,60 to 1,60 m² - medium; 3,30 to 4,00 m²- big. To enable the study applicability to other hot climates the results are also sorted by temperature ranges.



Table 10. Best window sizes based on Degree Days of Thermal Discomfort, unobstructed models.

SET	UNOBSTRUCTED SET								
TEMPERATURE RANGE	all simulated		24-27°C		27,1-29°C		29,1-31°C		Most frequent
BEST WINDOW SIZE	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	window size
1st Floor_AP 01_dorm*	J60	J120	J260	J330	J60	J120	J60	J120	small
1st Floor_AP 02_dorm*	J60	J120	J260	J330	J60	J120	J60	J120	small
1st Floor_AP 07_dorm*	J60	J120	J160	J330	J60	J120	J60	J120	small
1st Floor_AP 08_dorm*	J60	J120	J330	J120	J60	J120	J60	J120	small
1st Floor_AP 01_sala	J60	J120	J330	J260	J60	J120	J60	J120	small
1st Floor_AP 02_sala	J60	J120	J260	J330	J60	J120	J60	J120	small
1st Floor_AP 07_sala	J60	J120	J330	J260	J60	J120	J60	J120	small
1st Floor_AP 08_sala	J60	J120	J260	J160	J60	J120	J60	J120	small
4th Floor_AP 01_dorm*	J160	J120	J330	J160	J120	J160	J160	J120	medium
4th Floor_AP 02_dorm*	J120	J160	J330	J160	J160	J120	J120	J160	medium
4th Floor_AP 07_dorm*	J120	J60	J330	J160	J120	J60	J120	J160	small
4th Floor_AP 08_dorm*	J120	J60	J330	J160	J60	J120	J120	J160	small
4th Floor_AP 01_sala	J60	J120	J160	J330	J60	J120	J120	J60	small
4th Floor_AP 02_sala	J60	J120	J330	J160	J160	J120	J120	J160	small
4th Floor_AP 07_sala	J120	J60	J120	J330	J120	J60	J160	J120	small
4th Floor_AP 08_sala	J60	J120	J160	J120	J120	J160	J120	J160	small

*Average of the two bedrooms

Subtitle:

small

medium

large

Table 11. Best window sizes based on Degree Days of Thermal Discomfort, obstructed models.

SET	OBSTRUCTED SET								
TEMPERATURE RANGE	all simulated		24-27°C		27-29°C		29-31°C		Most frequent
BEST WINDOW SIZE	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	window size
1st Floor_AP 01_dorm*	J60	J120	J400	J330	J60	J120	J60	J120	small
1st Floor_AP 02_dorm*	J60	J120	J400	J330	J60	J120	J60	J120	small
1st Floor_AP 07_dorm*	J60	J120	J400	J330	J60	J120	J60	J120	small
1st Floor_AP 08_dorm*	J60	J120	J330	J400	J60	J120	J60	J120	small
1st Floor_AP 01_sala	J60	J120	J400	J330	J60	J120	J60	J120	small
1st Floor_AP 02_sala	J60	J120	J120	J260	J60	J120	J60	J120	small
1st Floor_AP 07_sala	J60	J120	J260	J160	J60	J120	J60	J60	small
1st Floor_AP 08_sala	J60	J120	J260	J330	J60	J120	J60	J120	small
4th Floor_AP 01_dorm*	J160	J260	J120	J400	J260	J160	J260	J160	medium
4th Floor_AP 02_dorm*	J260	J160	J60	J400	J330	J260	J260	J330	medium
4th Floor_AP 07_dorm*	J260	J160	J400	J260	J160	J400	J260	J330	medium
4th Floor_AP 08_dorm*	J260	J160	J330	J400	J260	J330	J260	J330	medium
4th Floor_AP 01_sala	J160	J120	J260	J330	J160	J120	J260	J160	medium
4th Floor_AP 02_sala	J160	J260	J260	J400	J160	J260	J260	J160	medium
4th Floor_AP 07_sala	J260	J330	J330	J400	J330	J400	J260	J330	big
4th Floor_AP 08_sala	J260	J330	J260	J330	J330	J260	J400	J260	medium

*Average of the two bedrooms

Subtitle:

small

medium

big

large



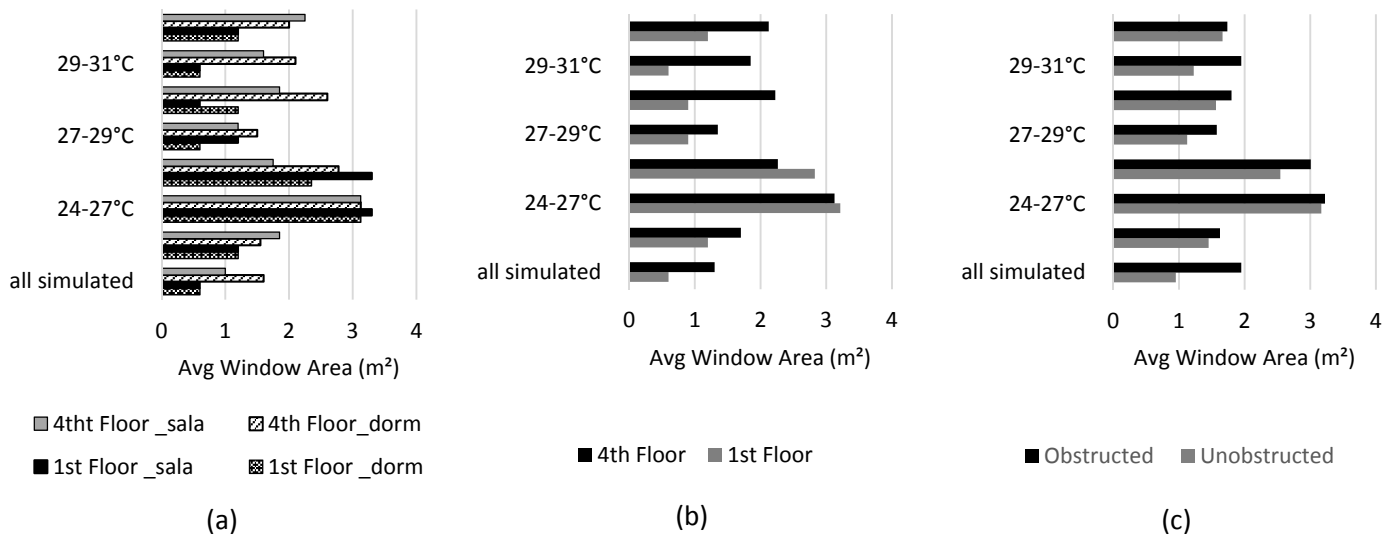


Figure 41. (a) Ideal windows average area of the dorms and living rooms on the first and fourth-floor; (b) Ideal windows average area of the rooms on the first and fourth-floor; (c) Ideal windows average area of the obstructed and unobstructed sets.

In unobstructed models (table 12), the first-floor apartments present better performance with smaller windows, except for the temperature range 24-27 ° C. At this temperature the best windows for the bedrooms are medium and large (1,60 to 3,30 m²) as for the living rooms large windows are better (2.60 to 400 m²). For the rooms on the fourth-floor apartments, the ideal window sizes were higher than in the first one. For the whole simulation, the best windows are also small. By considering the higher temperatures (27-31°C) the best performance varies from 1.60 to 2.60m² (medium). For the lowest temperature range the best windows are from medium to large (2,60 to 3,30m²). In the living rooms in this floor the ideal size of the windows is similar to the bedrooms, being smaller at 27-29°C temperature range for the whole simulation.

By analyzing the models of obstructed surroundings (table 5), we noted that at the first-floor apartment the small windows are ideal in all temperatures ranges except at 24-27°C, showing that in this model large windows are better. In the fourth-floor, the windows with better performance are the medium and large; however, for the living room in the temperatures range of 24-27°C small windows also show good performance.

Figure 43-a allows evaluating the position of the opening regarding the building floor plan. On the first-floor, the room's exposition to the sun was not influential. In the fourth-floor at the shaded rooms (living rooms), the ideal window size is small for all



temperatures except for high ones. Still, regarding the floor plan, the living rooms facing the courtyard show the same performance than those located on the outer edge of the building. It is important to note that, even if the courtyard did not influence the thermal behavior, it can affect the air quality and does not provide a constant ventilation (as discussed in item 4.2). On the other hand, the influence of the room's exposition to the sun has proved to be relevant.

In the next step, it was evaluated the window height regarding the ground (figure 43-b). It was observed that at the top floor the ideal windows are bigger than at the first-floor, the exception being the low-temperature range when floor height has little influence on the average.

Therefore, concerning the obstruction of the surrounding (figure 43-c), it is clear that for the obstructed models the best windows sizes are bigger than for the unobstructed ones. This is due to the reduction of the air speed by the obstructions as well as to the shading caused by the surrounding.



4.3.2.2 Orientation

To evaluate the building orientation, all apartments of the obstructed models were analysed at four orientations (0° , 45° , 90° , and 135°).

Figure 42 presents the average operative temperatures of the apartments by considering different window sizes. It is clear that in all cases the temperature curves are similar, but it can be noted that the apartments with the smaller window (J60) shows the highest temperatures while the lowest temperatures occur at apartments with J300.

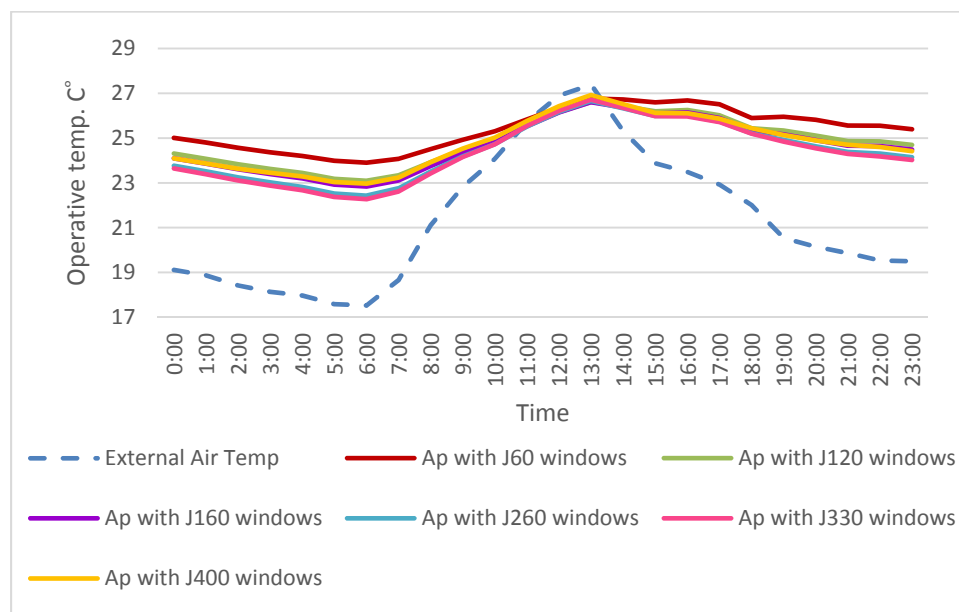


Figure 42. Daily variation of the operative temperature in apartments with different window sizes, for the summer solstice.

Table 12 presents the best and the second best window sizes, which means the models with the lowest values of Adaptive Comfort Degree-Days. The ideal window size for the fourth-floor was also represented by color in the floorplan; the first-floor is not approached because is presented uniform results, as seen in table 12. These results were classified by window size, as follows: $0,60$ to $1,20\text{m}^2$ - small; $2,60$ to $1,60\text{m}^2$ - medium; $3,30$ to $4,00\text{m}^2$ - big.

By analyzing table 12, we note that for all orientations apartments on the first-floor require small windows (from $0,60$ to $1,20\text{ m}^2$). It is also clear for apartments on the fourth-floor that the ideal windows for orientation 0° and 135° were the same, and for the



orientation 45° and 90°, the windows were similar. The dormitory of the fourth-floor presented similar needs for every orientation, and the most frequent window size was medium. Only at the orientations 45° and 90°, the dormitory of apartment one required small windows as the second best (1,20m²). The best window sizes for the living room and kitchen are different for each model. At 0° and 135°, the ideal windows are from 0,60 to 3,30m². The wide range of sizes presented in these orientations can be explained by the prevailing winds, as it becomes more clear in figure 43-c.

By observing the floor plan shown in table 12, it is clear that the courtyard does not show the thermal behavior as occurs in apartments with obstructed surrounding, since all the windows with view to the interior (the ones on the recess and those on the courtyard) show similar behavior. Nevertheless, it is relevant to note that this situation provides unreliable and poor quality ventilation, as brought to light on item 4.2.

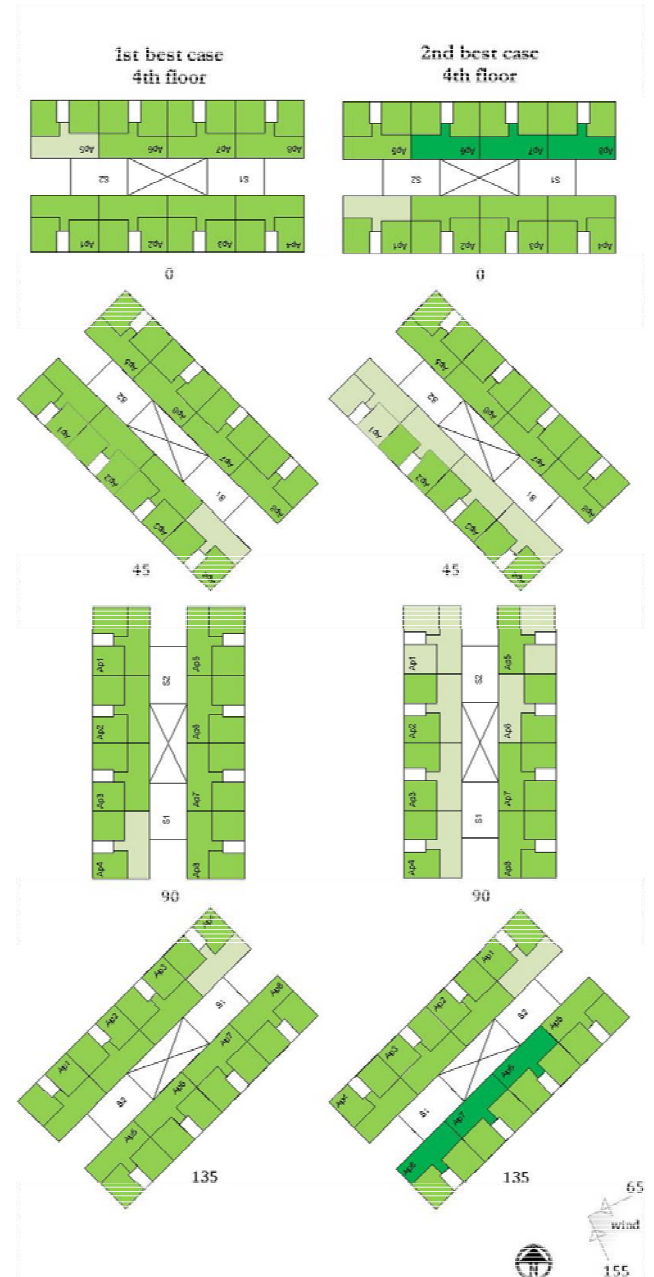
Figure 43-a shows that window sizes for the first-floor are smaller than for the fourth-floor since apartments on the first-floor need less ventilation to reach the ideal temperature due to contact with the ground. In addition, windows on the first-floor do not show any influence of the building orientation, which was not the model for the fourth-floor. In the first-floor, the influence of the wind attack angle is reduced because at this height the wind speed is low for all directions.

In respect to the results concerning orientation, figure 43-b shows that for building orientations 0° and 135° the windows should be bigger. This phenomenon is better explained through figure 43-c, where it is clear that apartments oriented to northeast, east and southeast require smaller windows. These orientations coincide with the prevailing wind and also receive less solar radiation. It is worth of noting that the behavior of the living room and the bedroom are very similar.



Table 12. Best window sizes based on Adaptive Comfort Degree-Days for different orientations.

Orientation	0°		45°		90°		135°	
Best case	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd	1st	2nd
1st Floor _AP 01_dorm*	J60	J120	J60	J120	J60	J120	J60	J120
1st Floor _AP 02_dorm*	J60	J120	J60	J120	J60	J120	J60	J120
1st Floor _AP 03_dorm*	J60	J120	J60	J120	J60	J120	J60	J120
1st Floor _AP 04_dorm*	J60	J120	J60	J120	J60	J120	J60	J120
1st Floor _AP 05_dorm*	J60	J120	J60	J120	J60	J120	J60	J120
1st Floor _AP 06_dorm*	J60	J120	J60	J120	J60	J120	J60	J120
1st Floor _AP 07_dorm*	J60	J120	J60	J120	J60	J120	J60	J120
1st Floor _AP 08_dorm*	J60	J120	J60	J120	J60	J120	J60	J120
1st Floor _AP 01_sala	J60	J120	J60	J120	J60	J120	J60	J120
1st Floor _AP 02_sala	J60	J120	J60	J120	J60	J120	J60	J120
1st Floor _AP 03_sala	J60	J120	J60	J120	J60	J120	J60	J120
1st Floor _AP 04_sala	J60	J120	J60	J120	J60	J120	J60	J120
1st Floor _AP 05_sala	J60	J120	J60	J120	J60	J120	J60	J120
1st Floor _AP 06_sala	J60	J120	J60	J120	J60	J120	J60	J120
1st Floor _AP 07_sala	J60	J120	J60	J120	J60	J120	J60	J120
1st Floor _AP 08_sala	J60	J120	J60	J120	J60	J120	J60	J120
4th Floor _AP 01_dorm*	J160	J260	J160	J120	J160	J120	J160	J260
4th Floor _AP 02_dorm*	J260	J160	J160	J260	J160	J260	J260	J160
4th Floor _AP 03_dorm*	J260	J160	J160	J260	J160	J260	J260	J160
4th Floor _AP 04_dorm*	J260	J160	J260	J160	J160	J260	J260	J160
4th Floor _AP 05_dorm*	J160	J260	J160	J260	J160	J120	J160	J260
4th Floor _AP 06_dorm*	J160	J260	J160	J260	J160	J260	J160	J260
4th Floor _AP 07_dorm*	J260	J160	J260	J160	J160	J260	J260	J160
4th Floor _AP 08_dorm*	J260	J160	J160	J260	J260	J160	J260	J160
4th Floor _AP 01_sala	J160	J120	J160	J120	J160	J120	J160	J120
4th Floor _AP 02_sala	J160	J260	J160	J60	J160	J60	J160	J260
4th Floor _AP 03_sala	J160	J260	J160	J60	J160	J60	J160	J260
4th Floor _AP 04_sala	J160	J260	J160	J60	J160	J60	J160	J260
4th Floor _AP 05_sala	J60	J160	J60	J160	J60	J160	J60	J160
4th Floor _AP 06_sala	J260	J330	J260	J160	J160	J60	J260	J330
4th Floor _AP 07_sala	J260	J330	J260	J160	J160	J260	J260	J330
4th Floor _AP 08_sala	J260	J330	J260	J160	J160	J260	J260	J330



Subtitle: small 0,60-1,20m² medium 1,60-2,60m² large 3,30-4,00m²

*Average of the two bedrooms



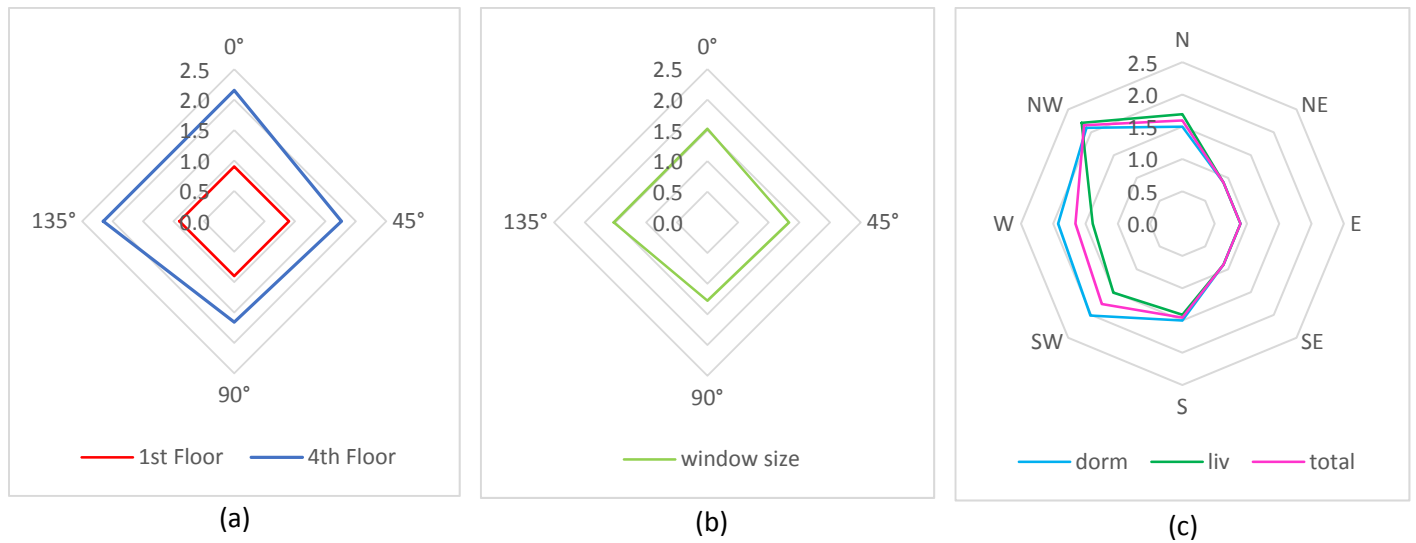


Figure 43. (a) – average ideal windows area of the rooms on the first and fourth-floor [m^2]; (b) - average ideal windows area for different buildings orientations [m^2]; (c) – average ideal windows area for different window orientations [m^2].

4.3.3 Conclusion

Thus, it was possible to evaluate the sizing of openings from the viewpoint of thermal comfort in naturally ventilated buildings, indicating those models with the best thermal performance, therefore contributing to improve the knowledge of the openings design and consequently to reduce energy costs.

Analyzing the window size with respect to the floor height, it is noted that at the first-floor the optimal windows were smaller than for the fourth-floor. This happens because at the first-floor temperatures are milder due to contact to the ground and its lower exposure to the sun; on the other hand at the top floor the heat gain through the roof causes increased temperatures, thus requiring higher wind speed.

For the Piracicaba climate, the wind does not blow predominantly from a single direction but from a range of angles, thus we considered the range of wind predominance to evaluate its influence on different window dimensions. Therefore, at the process of designing windows in different climates, it is recommended to observe if this is a similar model or not. Even when the occurrence of prevailing winds is low, this direction influences the ideal window size, which means that windows oriented to the prevailing wind can be smaller than the leeward ones.



In addition, even if the courtyard has no influence on the size of the windows, it has not a reliable ventilation and can bring undesirable odors.

The ideal windows on the first-floor show little influence of their orientation and have a smaller area when compared to those of the fourth-floor. This happens for two reasons: at the first-floor, the wind velocities are low for all orientations and at this level, temperatures are milder due either to contact to the ground and its lower exposure to the sun. On the other hand, on the top floor the heat gain through the roof causes increased temperatures, thus requiring better ventilation.

Therefore, it is clear that to determine the size of the windows it is necessary a balance between heat gain through windows and the temperature reduction due to wind-driven ventilation.

The sun exposition plays an important role on window dimensioning because window that receive direct sunlight tends to overheating, and consequently window size must be reduced, but with shading it is possible to have large windows improving the airflow. In some situations, when more ventilation is desirable but the large windows would cause overheating, shading devices should be considered. In this regard, future work could evaluate the influence of window shading devices on the ideal window sizes.

It is worth noting the strong influence of the climate on the results, so it is necessary to be very careful in applying these conclusions about the temperature ranges to other climates. Although this study only addresses one building geometry, the same methodology can be applied to other formats thus expanding the scope of the results.



5 CONCLUSÃO FINAL

Este trabalho teve como objetivo investigar o dimensionamento de sistemas de ventilação em prédios residenciais ventilados pela ação dos ventos e o seu impacto no desempenho térmico. A pesquisa se dividiu em três etapas: na primeira foram investigados parâmetros geométricos de dimensionamento de sistemas de abertura em um cômodo. Na segunda, foi avaliado o comportamento do fluxo de ar em um prédio residencial. Na última etapa, foram avaliadas as configurações de abertura que resultam em situações de conforto térmico em edifícios residenciais.

Na primeira etapa pode-se verificar que os principais fatores para o dimensionamento das aberturas em um cômodo são a área e orientação das aberturas, pois apresentaram significativa influência na média da velocidade do ar no interior do cômodo estudado.

A proporção e posição das aberturas podem ser considerados parâmetros secundários, pois influenciaram o fluxo e a uniformidade do movimento do ar, apesar de não terem mostrado grande influência na média das velocidades. Também foi observado que a melhor orientação para as janelas é entre 45º e 135º em relação aos ventos predominantes.

Antes de dimensionar as janelas de um edifício é necessário definir o tipo e localização das atividades previstas para os ambientes em questão para então verificar o movimento do ar desejável para o espaço. Por exemplo, em locais onde se realizam atividades como escrita e leitura, altas velocidades do ar causam incômodo e, portanto, seria melhor que o fluxo de ar fosse direcionado para outro ponto do cômodo; por outro lado, onde são previstas atividades como descanso, o vento é bem-vindo, podendo-se então prever o ar fluindo por ali.

As normas de ventilação natural brasileiras não consideram todos os parâmetros estudados. Como ao longo do estudo ficou clara a influência da área, orientação, posição e proporção das aberturas, recomenda-se sua inclusão nas normas.

Na etapa dois foi identificado que o formato em “duplo H”, apesar de largamente aplicado no estado de São Paulo, não provê boa ventilação em todos os apartamentos; assim recomenda-se a adoção do formato de “H” comum que possibilita



maior fluxo e qualidade do ar. Além disso, deve haver uma preocupação com a posição do banheiro, evitando-se que a sua janela sirva de entrada de ar para outros ambientes.

Finalmente, na terceira etapa foi possível identificar que não há um único tamanho ideal de janela para todo um edifício. Cada janela deve ser pensada levando-se em conta sua posição em planta (exposição ao sol e aos ventos), altura com relação ao solo, obstrução do entorno e orientação com relação ao sol e aos ventos predominantes.

É importante ressaltar que os fatores a serem considerados para um projeto de sistema de ventilação pela ação dos ventos dependem da escala e objetivos do projeto. Quando se projeta ambientes com um uso definido, é possível pensar nos caminhos do vento, induzindo o fluxo para onde são desejáveis maiores velocidades do ar; assim, recomenda-se considerar a área, proporção, posição e orientação da janela. Porém, quando se projeta ambientes genéricos, este tipo de detalhamento não é possível; nestes casos leva-se em conta a área e orientação das janelas. Já os parâmetros posição em planta, altura em relação ao solo, obstrução do entorno e orientação sempre devem ser considerados.

Em uma aplicação prática destes conceitos nem sempre é possível projetar janelas de diferentes tamanhos em um mesmo prédio, neste caso sugere-se a adoção do maior tamanho de janela, pois em caso de desconforto é possível fechar a janela.

Em linhas gerais, observou-se que, independentemente da posição em planta ou da orientação, as janelas do primeiro andar sempre devem ser menores que as do último. No primeiro pavimento, as janelas também apresentaram pouca influência da orientação e posição em planta, já que nesta altura a velocidade próxima das aberturas sofre pouca influência destes fatores.

Por fim, este trabalho buscou incentivar o uso da ventilação natural como estratégia de conforto, colaborando para reduzir os gastos com condicionamento artificial dos ambientes. Espera-se que, para futuros trabalhos, seja possível aplicar o mesmo método em outras zonas bioclimáticas e outras plantas de apartamentos. Outro tema relevante que poderia ser abordado é a influência de protetores solares para o dimensionamento de aberturas.



REFERÊNCIAS

ABNT. NBR 15220: Desempenho Térmico de Edificações -Parte 1 : Definições , símbolos e unidades. 2005, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 2005.

ABNT. NBR 15575-1: Edificações Habitacionais- Desempenho - Parte 1: Requisitos gerais Prefácio. 2013a, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 2013. p.60.

ABNT. NBR 15575-4: Edificações habitacionais - Desempenho - Parte 4: Sistemas de vedações verticais externas e internas. 2013b, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 2013. p.51. 9788507007036. .

ABNT. NBR 15575-5: Edificações habitacionais- Desempenho - Parte 5: Requisitos para sistemas de coberturas. 2013c, Rio de Janeiro, Brasil: ABNT, 2013. p.63.

AFLAKI, Ardalan *et al.* A review on natural ventilation applications through building facade components and ventilation openings in tropical climates. **ENERGY AND BUILDINGS** v. 101, p. 153–162 , 2015.

AL-SALLAL, K.A. Sizing windows to achieve passive cooling, passive heating, and daylighting in hot arid regions. **Renewable Energy** v. 14, n. 4, p. 365–371 , 1998.

ALDAWOUD, A. Windows design for maximum cross-ventilation in buildings. **Advances in Building Energy Research** , 2016.

ALI, Abdel Aziz Ali; MILAD, Guirguis Nabil; ALI, Hassan Mahmoud. Effect of natural ventilation and wind direction on the thermal performance of a building ceiling. 2007, Beijing: [s.n.], 2007. p.410–414. 9781622765447. .

ALLARD, F; GHIAUS, C. **Natural ventilation in the urban environment: assessment and design**. [S.l.]: Earthscan James and James Publications, 2005. 266 p. .978-1844071296.

ARANTES, Beatriz; LABAKI, Lucila Chebel. Fachadas sazonalmente adaptáveis: mapeamento sistemático da literatura. 2016, São Paulo, Brasil: ENTAC, 2016. p.10.

ASFOUR, Omar S.; GADI, Mohamed B. A comparison between CFD and Network models for predicting wind-driven ventilation in buildings. **Building and Environment** v. 42, n. 12, p. 4079–4085 , 2007.

ASHRAE. ASHRAE 55: Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. 2013, Estados Unidos: ASHRAE, 2013. 9781936504268. .

ASHRAE. ASHRAE 62 : Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. 2004, USA:



ASHRAE, 2004.

BAHARVAND, Ehsan. **How to model a wall solar chimney? Complexity and Predictability**. Technische Universiteit, Eindhoven, 2010.

BEN. **Balanco Energético Nacional. 2015 - Ano Base 2015**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2016.

BUCCOLIERI, R. An application of ventilation efficiency concepts to the analysis of building density effects on urban flow and pollutant concentration. **International Journal of Environment and Pollution** , 2011.

CAIXA ECONÔMICA FEDERAL. *Selo Casa Azul: Boas práticas para habitação mais sustentável*. São Paulo: Páginas e Letras. Disponível em: <<http://www.caixa.gov.br/sustentabilidade/produtos-servicos/selo-casa-azul/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 19 maio 2015. , 2010

CANDIDO, Christhina *et al.* Air movement acceptability limits and thermal comfort in Brazil's hot humid climate zone. **Building and Environment** v. 45, n. 1, p. 222–229 , 2010.03601323 (ISSN).

CÂNDIDO, Christhina; DEAR, Richard De; LAMBERTS, Roberto. Combined thermal acceptability and air movement assessments in a hot humid climate. **Building and Environment** v. 46, p. 7 , 2011.

CEPAGRI. *Clima dos Municípios Paulistas*. Disponível em: <http://www.cpa.unicamp.br/outras-informacoes/clima_muni_436.html>. Acesso em: 1 maio 2016.

COST. **Cost Action 14: recommendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment**. Brussels: COST, 2004.

CÓSTOLA, Daniel. **Ventilação por ação do vento no edifício: procedimentos para quantificação** Dissertação (mestrado). Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CÓSTOLA, Daniel; ALUCCI, Marcia. Pressure coefficient simulated by CFD for wind-driven ventilation analysis. **Proceedings: Building Simulation 2007** n. 2003, p. 999–1006 , 2007.

DACANAL, Cristiane. **Fragmentos florestais urbanos e interações climáticas em diferentes escalas: estudos em Campinas, SP** Tese (doutorado). Unicamp, 2011.



DEAR, Richard De; BRAGER, Gail S. Thermal comfort in naturally ventilated buildings: Revisions to ASHRAE Standard 55. **Energy and Buildings** v. 34, n. 6, p. 549–561 , 2002.0378-7788.

DEAR, Richard De; BRAGER, Gs. Developing an adaptive model of thermal comfort and preference. **ASHRAE Transactions** v. 104, p. 1–18 , 1998.

ENERGY, Us Department Of. EnergyPlus Engineering Reference: The Reference to EnergyPlus Calculations. **US Department of Energy** p. 1051 , 2015. Disponível em: <<http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:EnergyPlus+Engineering+Reference,+The+Reference+to+EnergyPlus+Calculations#1>>.

ENERGYPLUS. *Input/output reference: The encyclopedic reference to EnergyPlus input and output* . [S.l.: s.n.]. Disponível em: <<http://apps1.eere.energy.gov/buildings/energyplus/pdfs/inputoutputreference.pdf>> . , 2015

FANGER, P. O. **Thermal comfort: Analysis and Application in Environmental Engineering**. Copenhagen: Danish Technical, 1970. 244 p. .

GIVONI, B. Comfort, climate analysis and building design guidelines. **Energy and buildings** , 1992. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037877889290047K>>. Acesso em: 18 maio 2015.

HUMPHREYS, Michael A. *Fields study of thermal comfort compared and applied* . **Building Research Establishment (BRE)**. Garston: [s.n.] . , 1975

HUO, Xiao Ping; HU, Jia Yu; LI, Dan. The Research on Influence of Different Forms of Window on Indoor Natural Ventilation in Residential Building. **Applied Mechanics and Materials** Applied Mechanics and Materials. v. 353–356, p. 3109–3113 , 2013.978-3-03785-775-5.

IBGE. **Sinopse censo 2010**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2011. Disponível em: <http://biblioteca.ibge.gov.br/visualizacao/livros/liv64529_ref_glossario_equipetec.pdf>.

INANICI, Mehlika N; DEMIRBILEK, F.Nur. Thermal performance optimization of building aspect ratio and south window size in five cities having different climatic characteristics of Turkey. **Building and Environment** v. 35, n. 1, p. 41–52 , 2000.



INMETRO, INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA E QUALIDADE INDUSTRIAL. *RTQ-C - Requisitos Técnicos da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edifícios Comerciais, de Serviços e Públicos*. Rio de Janeiro: INMETRO. , 2013a

INMETRO, INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA E QUALIDADE INDUSTRIAL. *RTQ-R - Regulamento Técnico da Qualidade para o Nível de Eficiência Energética de Edificações Residenciais*. Rio de Janeiro: INMETRO. , 2013b

IQBAL, A *et al.* Discharge coefficient of centre-pivot roof windows. **Building and Environment** , 2015.

JANDA, Kathryn B.; BUSCH, John F. *Worldwide status of energy standards for buildings*. **Energy**. [S.l: s.n.]. , 1994

JIAN, Y. Study on effects of building form on solar thermal application. **Taiyangneng Xuebao/Acta Energetica Solaris Sinica** v. 28, n. 1, p. 108–112 , 2007.

KARAVA, P; STATHOPOULOS, T; ATHENITIS, A K. Impact of internal pressure coefficients on wind-driven ventilation analysis. **International Journal of Ventilation** v. 5, n. 1, p. 53–66 , 2006. Disponível em: <<https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-33748854617&partnerID=40&md5=717a8ae670e276dfa7ad55d072ef394d>>.

KHEMLANI, Lachmi. GENWIN: A generative computer tool for window design in energy-conscious architecture. **Building and Environment** v. 30, n. 1, p. 73–81 , 1995.

KUANG, X; CHEN, J; SUN, C. Evaluation of Ventilation Effectiveness of Microscale and Middle-Scale Urban Green Belt Based on Computer Simulation. **Low-carbon City and New-type Urbanization** , 2015.

LABAKI, Lucila C. *et al.* Ventilation in Self-Built Houses - A Study Through Wind Tunnel Measurements in Campinas, Brazil. **International Journal of Ventilation** v. 10, n. 2 , 1 set. 2011.

LABAKI, Lucila C.; KOWALTOWSKI, Doris C.C.K. Bioclimatic and vernacular design in urban settlements of Brazil. **Building and Environment** v. 33, n. 1, p. 63–77 , jan. 1998.

LAMBERTS, Roberto *et al.* Sustentabilidade nas edificações: contexto internacional e algumas referências brasileiras na área. **Universidade Federal de Santa Catarina** , 2008. Disponível em: <http://labeee.ufsc.br/sites/default/files/documents/sustentabilidade_nas_edificacoes_co



ntexto_internacional_e_algunas_referencias_brasileiras_na_areasustentabilidade_nas_edificacoes_contexto_internacional_e_algunas_referencias_brasileiras_na_area.pdf>.

Acesso em: 18 maio 2015.

LAMBERTS, Roberto; DUTRA, Luciano; PEREIRA, Fernando O. R. Eficiência Energética na Arquitetura. p. 382 , 2014.

LOPES, Felipe da Silva Duarte; CÓSTOLA, Daniel; LABAKI, Lucila Chebel. Panorama de consumo energético para estudos de eficiência em edifícios de escritório em regiões de clima tropical. 2015, São Paulo, Brasil: [s.n.], 2015. p.9.

LUKANTCHUKI, Marieli Azoia *et al.* Sheds extratores e captadores de ar: influência da geometria e da dimensão das aberturas no desempenho da ventilação natural nas edificações. **Ambiente Construído** v. 16, n. 1, p. 83–104 , jan. 2016.

LUKANTCHUKI, Marieli Azoia; CARAM, Rosana Maria. The use of sheds to promote the natural ventilation: the work of Brazilian architect João Filgueiras Lima, Lelé. 2012, Londres, Inglaterra: [s.n.], 2012. p.17.

MANU, Sanyogita *et al.* Assessment of Air Velocity Preferences and Satisfaction for Naturally Ventilated Office Buildings in India. 2014, Ahmedabad: [s.n.], 2014. p.1–8.

MCGILLIGAN, Charles; NATARAJAN, Sukumar; NIKOLOPOULOU, Marialena. Adaptive comfort degree-days: A metric to compare adaptive comfort standards and estimate changes in energy consumption for future UK climates. **Energy and Buildings** v. 43, n. 10, p. 2767–2778 , 2011.03787788.

MCNALL JR, P. E., JAAX, J., ROHLES, F. H., NEVINS, R. G., & SPRINGER, W. *Thermal comfort (thermally neutral) conditions for three levels of activity* . [S.l: s.n.] , 1967

MEDINILHA, Talita Andrioli; LABAKI, Lucila Chebel. Let's open these windows! The influence of opening design parameters on natural ventilation. 2016, Los Angeles: PLEA, 2016.

Disponível em: <<http://plea2016.uscarch.com/index.php/pleapapers/fullpapers/paper/view/1288>>.

MILNE, Murray. *Climate consultant* . Los Angeles: Department of Architecture and Urban Design. Disponível em: <<http://www.energy-design-tools.aud.ucla.edu/climate-consultant/>>. , 2016

MIRZAEI, PA; HAGHIGHAT, F. A procedure to quantify the impact of mitigation



techniques on the urban ventilation. **Building and environment** n. 47, p. 410–420 , 2012.

MORAIS, Juliana M S C; LABAKI, Lucila C; ROSA, Leonardo M. A influência da tipologia arquitetônica na ventilação natural interna de edifícios do “Minha casa minha vida”. Tese (Doutorado). 2012, Juiz de Fora: ENTAC- Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 2012. p.3237–3243.

MORAIS, Juliana M S C; LABAKI, Lucila Chebel. Evaluating natural ventilation in multi-storey social housing. 2013a, [S.l: s.n.], 2013. Disponível em: <<http://mediatum.ub.tum.de/node?id=1169290>>. Acesso em: 1 maio 2016.

MORAIS, Juliana M S C; LABAKI, Lucila Chebel. **Ventilação natural em edifícios multifamiliares do “Programa Minha Casa Minha Vida”**. Biblioteca Digital da Unicamp, Campinas, 2013b.

NEVINS, R. G. *et al.* *A temperature-humidity chart for thermal comfort of seated persons.* . [S.l: s.n.], 1966

NG, E *et al.* Improving the wind environment in high-density cities by understanding urban morphology and surface roughness: a study in Hong Kong. **Landscape and Urban Planning** n. 101, p. 59–74 , 2011.

NICO-RODRIGUES, Edna Aparecida *et al.* Quando a janela define a condição de desempenho térmico em ambientes ventilados naturalmente: caso específico das edificações multifamiliares em Vitória, ES. **Ambiente Construído** v. 15, n. 2, p. 7–23 , jun. 2015.1500020001.

OHBA, Masaaki; TSUKAMOTO, Kenji; LUN, Isaac. *State and Prospects of Natural / Cross Ventilation Research in TPU* . Tokyo: Tokyo Polytechnic University. Disponível em: <http://www.wind.arch.tokougei.ac.jp/system/file/activity_reports/GCOE_P2_REPORT.pdf>. , 2013

OLIVEIRA, Mariela Cristina Ayres De. **Computer simulation for evaluation of the effects of modifications in self-built houses in ventilation** Tese (Doutorado). Biblioteca Digital da Unicamp, Campinas, 2009.

P. KARAVA; T. STATHOPOULOS; ATHIENITIS, A.K. Wind Driven Flow Through Openings – A Review of Discharge Coefficients. **International Journal of Ventilation** v. 3, n. 3, p. 255–266 , 2011.1473-3315.



PARKINSON, Thomas; DE DEAR, Richard; CANDIDO, Christhina. Thermal pleasure in built environments: alliesthesia in different thermoregulatory zones. **Building Research & Information** p. 1–14 , 10 jul. 2015. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/09613218.2015.1059653>>. Acesso em: 16 jul. 2015.

PEREIRA, Helena A. da C. et al. **Manual de simulação computacional de edifícios naturalmente ventilados no programa Energy Plus – versão 8.0**. Florianópolis – SC: [s.n.], 2013.

PERÉN, JI *et al.* 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.

PÉREZ-LOMBARD, Luis; ORTIZ, José; POUT, Christine. A review on buildings energy consumption information. **Energy and Buildings** v. 40, n. 3, p. 394–398 , jan. 2008. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778807001016>>. Acesso em: 9 jul. 2014.

PERSSON, ML; ROOS, A; WALL, M. Influence of window size on the energy balance of low energy houses. **Energy and Buildings** , 2006.

RIVERO, Roberto. **Arquitetura e clima**. [S.l.]: D. C. Luzzatto, 1986. .9788585038441.

RORIZ, Maurício. *Base de dados climáticos de 411 municípios brasileiros*. Disponível em: <http://www.roriz.eng.br/epw_9.html>. Acesso em: 7 out. 2015a.

RORIZ, Maurício. **Correções nas Irradiâncias e Iluminâncias dos arquivos EPW da Base ANTAC**. Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído São Carlos: [s.n.], 2012b. Disponível em: <[http://roriz.dominiotemporario.com/doc/Correcoes nos arquivos EPW - ANTAC.pdf](http://roriz.dominiotemporario.com/doc/Correcoes%20nos%20arquivos%20EPW%20-%20ANTAC.pdf)>. Acesso em: 5 abr. 2016.

RUAS, Álvaro César. **Sistematização da avaliação de conforto térmico em ambientes edificadas e sua aplicação num software**. Biblioteca Digital da Unicamp, 2002. Disponível em: <<http://www.bibliotecadigital.unicamp.br/document/?code=vtls000283945&fd=y>>. Acesso em: 11 maio 2015.



RUIZ-RUBE, Ivan *et al.* Uses and applications of Software & Systems Process Engineering Meta-Model process models. A systematic mapping study. **Journal of Software: Evolution and Process** v. 26, n. 12, p. 1172–1192 , 2014.

RUPP, R.F.; GHISI, E. Sizing window areas for daylighting and hybrid ventilation in commercial buildings. 2012, Lima: [s.n.], 2012. p.6.

SANTAMOURIS, M. *et al.* Recent progress on passive cooling techniques. Advanced technological developments to improve survivability levels in low-income households. **Energy and Buildings** v. 39, n. 7, p. 859–866 , 2007.

SOKHI, Ranjeet S. *et al.* (Orgs.). **Urban Air Quality: Measurement, Modelling and Management**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2000. Disponível em: <<http://www.springerlink.com/index/10.1007/978-94-010-0932-4>>. Acesso em: 22 fev. 2016. .978-94-010-3796-9.

STEPHEN NIMLYAT, P; ZIN KANDAR, M; SEDIADI, E. Empirical investigation of indoor environmental quality (IEQ) performance in hospital buildings in Nigeria. **Jurnal Teknologi** v. 77, n. 14, p. 41–50 , 2015.

SUGA, Kentaro; KATO, Shinsuke; HIYAMA, Kyosuke. Structural analysis of Pareto-optimal solution sets for multi-objective optimization: An application to outer window design problems using Multiple Objective Genetic Algorithms. **Building and Environment** v. 45, n. 5, p. 1144–1152 , 2010.

TABESH, Tofigh; SERTYESILISIK, Begum. An Investigation into Energy Performance with the Integrated Usage of a Courtyard and Atrium. **BUILDINGS** v. 6, n. 2 , jun. 2016.

TOLEDO, Alexandre Márcio. **Avaliação do desempenho da ventilação natural pela ação do vento em apartamentos : uma aplicação em Maceió/AL**. UFSC, Florianópolis, 2006. 253 p.

TOLEDO, Alexandre Márcio. Critérios para o dimensionamento de aberturas de ventilação natural dos edifícios. 2001, São Pedro, Brasil: ANTAC, 2001.

TRINDADE, Sileno Cirne; PEDRINI, Aldomar; DUARTE, Raimundo Nonato Calazans. Métodos de aplicação da simulação computacional em edifícios naturalmente ventilados no clima quente e úmido. **Ambiente Construído** v. 10, n. 4, p. 37–58 , 2010.



WANG, H; KARAVA, P; CHEN, Q. Development of simple semiempirical models for calculating airflow through hopper, awning, and casement windows for single-sided natural ventilation. **Energy and Buildings** , 2015.

WANG, L; HIEN, W N. The impact of façade designs: Orientations, window to wall ratios and shading devices on indoor environment for naturally ventilated residential buildings in Singapore. 2006, Geneva: [s.n.], 2006. p.1293–1297.

WANG, L; WONG NYUK, H; LI, S. Facade design optimization for naturally ventilated residential buildings in Singapore. **Energy and Buildings** v. 39, n. 8, p. 954–961 , 2007.

WANG, QN; GUAN, YL; LIAO, QH. Experimental Study on Discharge Coefficients of Windward Window in Buildings with Wind-driven Cross Ventilation. **Advanced Materials Research** , 2014.

XIE, M.-J. *et al.* Field study of the thermal environment of the traditional residential building in the north of hunan province in summer. **Journal of Hunan University Natural Sciences** v. 36, n. 3, p. 16–21 , 2009.

YUAN, C; NG, E. Building porosity for better urban ventilation in high-density cities—A computational parametric study. **Building and Environment** , 2012.

ZMEUREANU, R. Optimization of the Insulation Level of Energy Efficient Houses in Montreal. **Journal of Building Physics** v. 12, n. 2, p. 124–135 , 1 out. 1988.



APÊNDICE I. CFX ANSYS 16.2–PHYSICS

Tabela 8. Domain Physics configurations used for CFX ANSYS 16.2 simulations

Domain	
Type	Fluid
<i>Materials</i>	
Air Ideal Gas	
Fluid Definition	Material Library
Morphology	Continuous Fluid
<i>Settings</i>	
Buoyancy Model	Non Buoyant
Domain Motion	Stationary
Reference Pressure	1.0000e+00 [atm]
Heat Transfer Model	Isothermal
Fluid Temperature	2.0000e+01 [C]
Turbulence Model	k epsilon
Turbulent Wall Functions	Scalable

The settings used for the simulations were widely applied and accepted (CÓSTOLA; ALUCCI, 2007; LUKIANTCHUKI; CARAM, 2012; MORAIS; LABAKI, 2013a) so the proportions of the results are reliable. It is worth to mention that since the results were not validated by experimentation, possibly there are some discrepancies with the real case.

Due to the computer configurations and the complexity of the models, the simulation time for the second experiment took about 12 to 16 hours. For this reason, it was decided to set the number of gaps across cells as three and not higher. Future work could consider improving this number for better correspondence to reality.

APÊNDICE II. CFX ANSYS 16.2– BOUDARY LIMIT LAYER, CCL EXPRESION.

CCL expression used to enter boundary layer calculation in CFD simulation, based on (CÓSTOLA, 2006):

“LIBRARY:

CEL:

&replace EXPRESSIONS:

$ak = 0.41 []$

$cmu = 0.09 []$

$cmuhalf = cmu^{0.5}$

$denref = prefnew / (rgas * tamb)$

$dir = 0$

$dira = (180 + dir) * \pi / 180$

$ed1 = (ustarnew^3) / (ak * (zmod - zref))$

$epsinner = 0.4 * unitlen$

$epsouter = 1.5 * unitlen$

$gradh = 500 * unitlen$

$pamb = prefnew * (\exp(-g * z / (rgas * tamb)) - 1.0)$

$\pi / 180 = \pi / 180$

$prefnew = 101325. [Pa]$

$rgas = 287.09601 [J \ kg^{-1} \ K^{-1}]$

$speed = ustarnew * \log((zmod - zref) / z0) / ak$

$tamb = 288.15 [K]$

$te1 = (ustarnew^2) / cmuhalf$

$thetaa = dira$

$u1 = speed * \sin(thetaa)$

$unitlen = 1. [m]$

$unittime = 1. [s]$

$unitvel = 1. [m^1 s^{-1}]$

$uref = 2.27 * unitvel$

```
ustarnew = ak*uref/log((zuref-zref)/z0)
v1 = speed*cos(thetaa)
z0 = 0.3*unitlen
zmod = abs(z + 0.005*unitlen)
zref = 0*unitlen
zuref = 10*unitlen
END
END
END"
```

APÊNDICE III. OPERATIVE TEMPERATURE OF EXPERIMENT 4.3

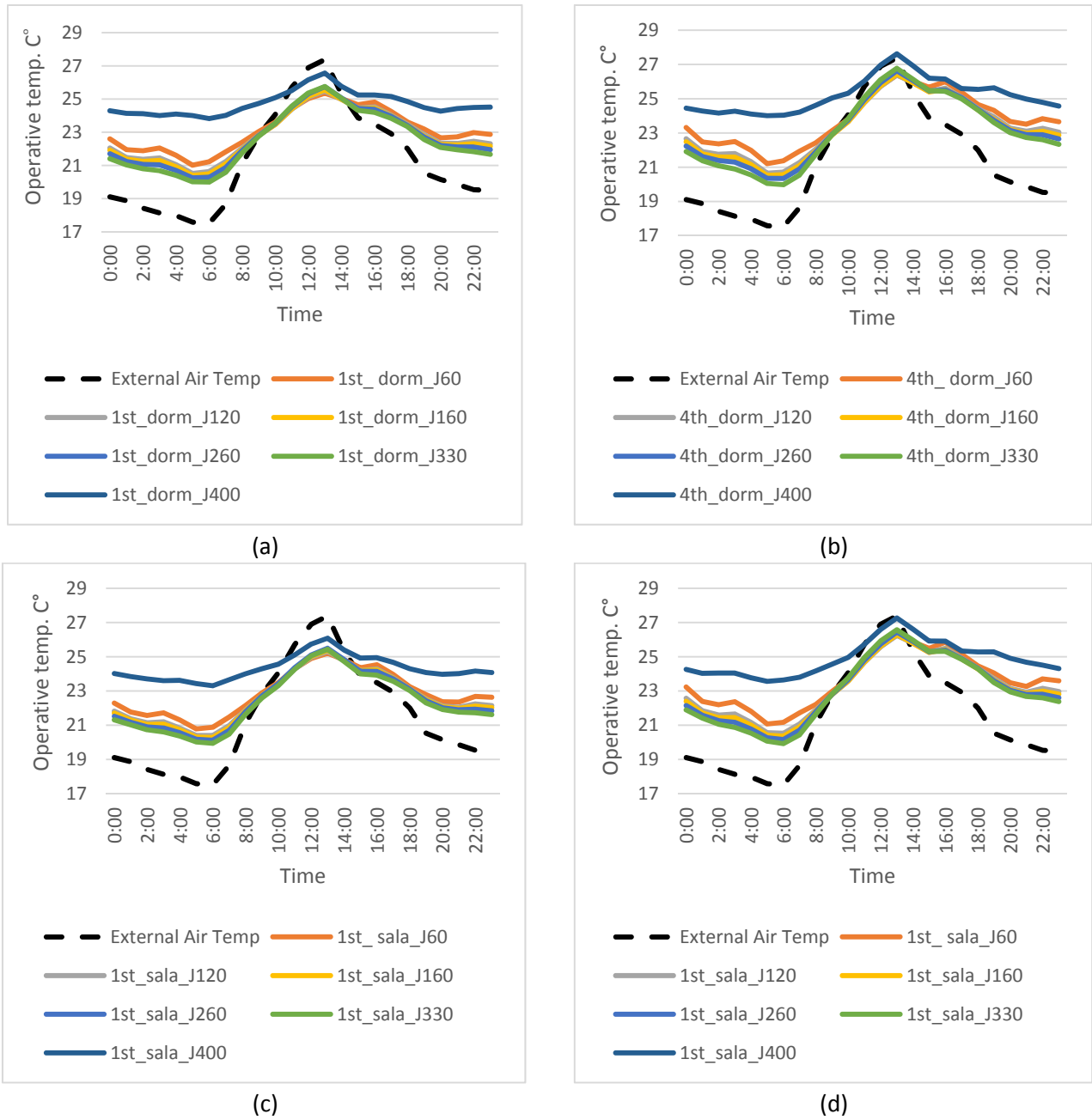


Figure 44. Daily variation of the operative temperature on apartments with unobstructed surrounding, on the summer solstice. (a) Bedrooms on the first floor and (b) fourth floor, (c) living rooms on the first floor and (d) fourth floor.

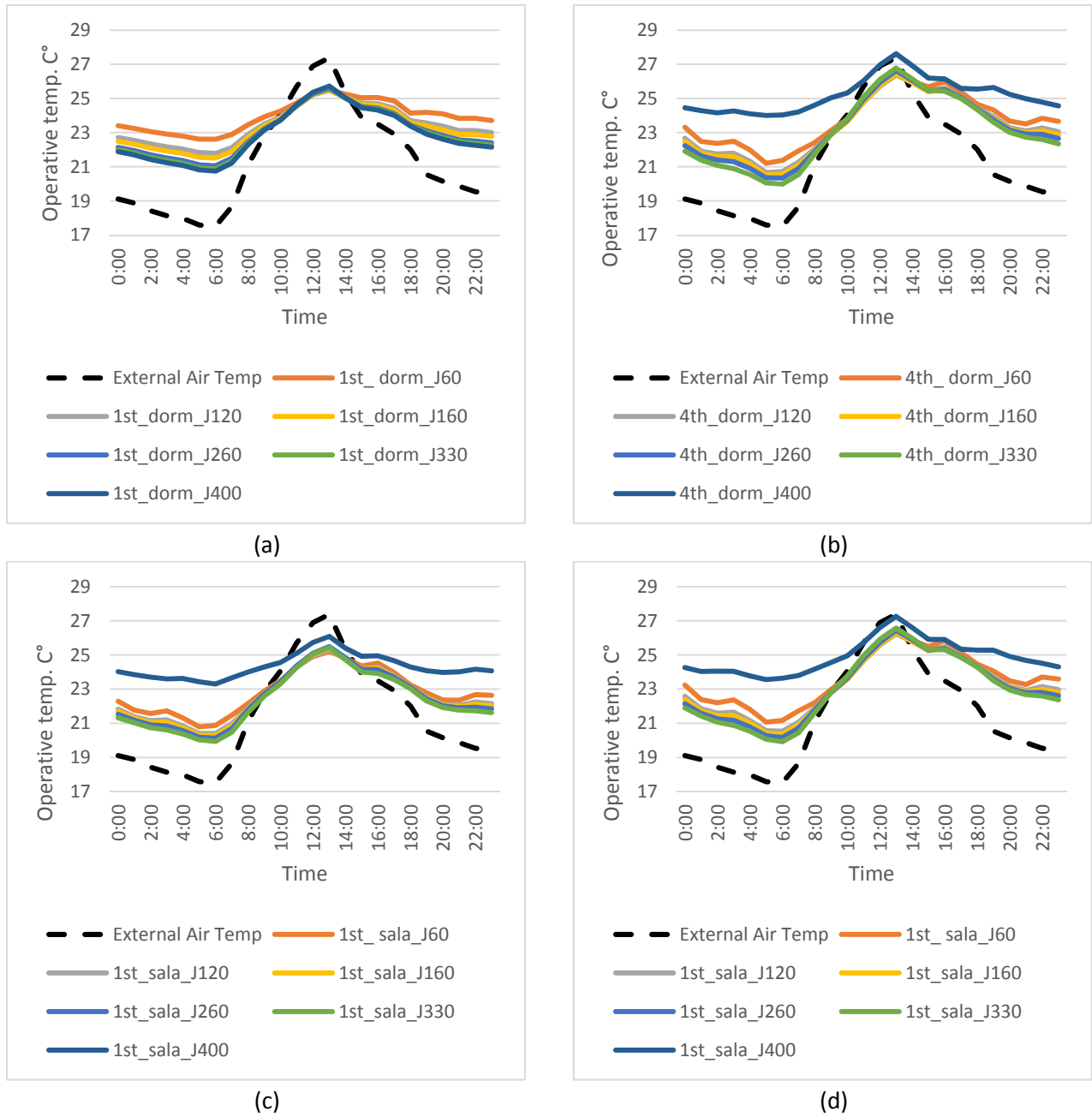
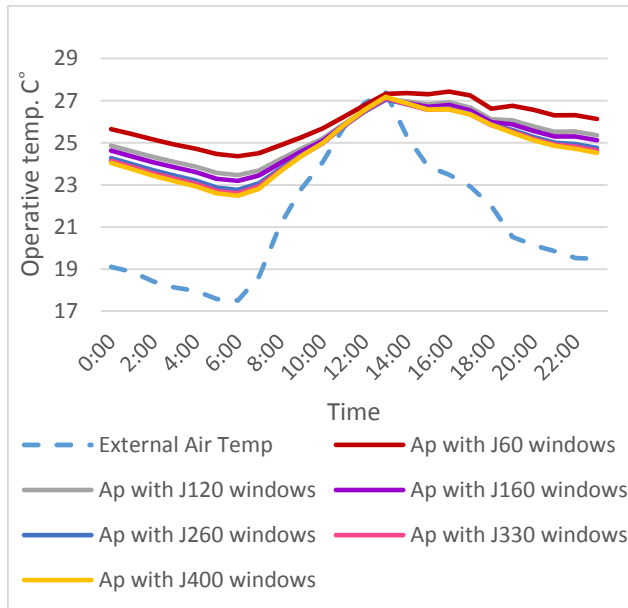
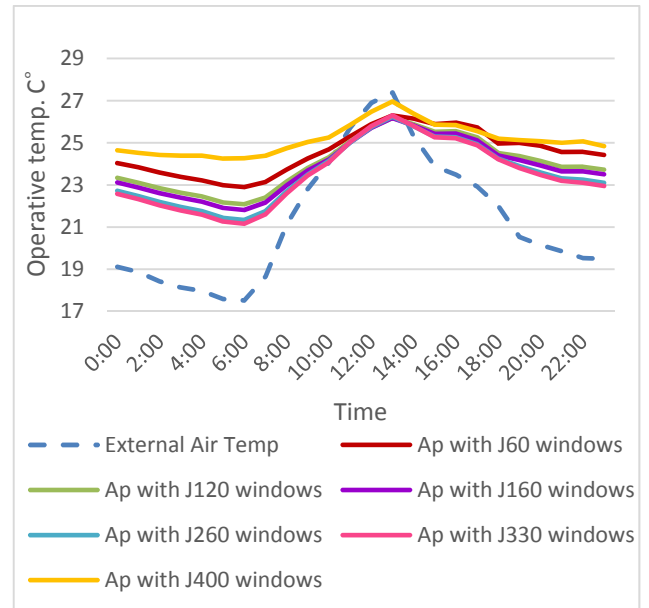


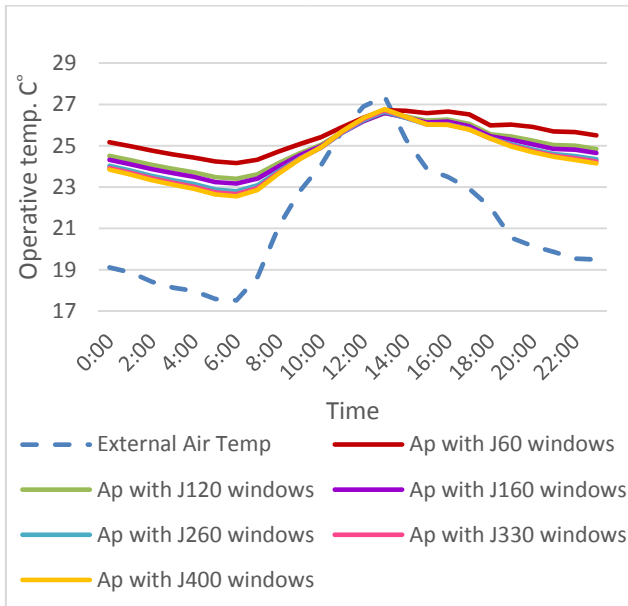
Figure 45. Daily variation of the operative temperature on apartments with obstructed surrounding, on the summer solstice. (a) Bedrooms on the first floor and (b) fourth floor, (c) living rooms on the first floor and (d) fourth floor.



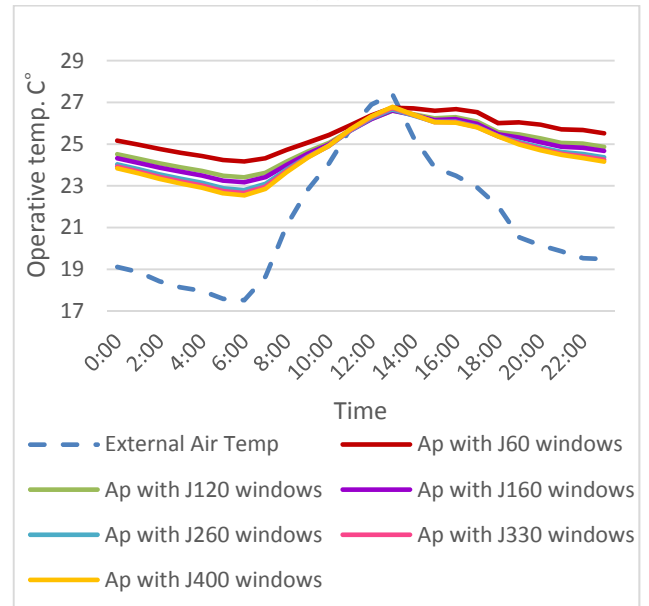
(a)



(b)



(c)



(d)

Figure 46. Daily variation of the operative temperature on apartments with different building orientation. (a) 0°, (b) 45°, (c) 90° and, (d) 135°.