

SABRINA ANDRADE BARBOSA

**FACHADAS DUPLAS EM CLIMA TROPICAL DE ALTITUDE: ANÁLISE DO
POTENCIAL DE VENTILAÇÃO PARA AMBIENTES POR MEIO DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2012**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

B238f
2012

Barbosa, Sabrina Andrade, 1985-

Fachadas duplas em clima tropical de altitude : análise do potencial de ventilação para ambientes por meio de simulação computacional / Sabrina Andrade Barbosa.

– Viçosa, MG, 2012.

xi, 104f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Inclui anexos.

Orientador: Túlio Márcio de Salles Tibúrcio.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 90-94.

1. Fachadas (Arquitetura). 2. Simulação (Computadores).
3. Ventilação. I. Universidade Federal de Viçosa. II. Título.

CDD 22. ed. 729.1

SABRINA ANDRADE BARBOSA


**FACHADAS DUPLAS EM CLIMA TROPICAL DE ALTITUDE: ANÁLISE DO
POTENCIAL DE VENTILAÇÃO PARA AMBIENTES POR MEIO DE SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 17 de abril de 2012.


Leticia Maria Araújo Zambrano


Joyce Correia Carlo
(coorientadora)


Túlio Márcio de Salles Tibúrcio
(orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus, por ter me dado saúde para chegar onde estou neste momento.

Aos meus pais, Rui de Souza Barbosa e Cleuza Geralda Andrade Barbosa, pelo incentivo e amor que me dão forças para permanecer firme em minha caminhada.

À minha irmã Sara, pela proximidade e apoio durante esses anos.

Ao Edgard por ter me acompanhado ao longo desse caminho.

À minha tia Sônia que ajudou a ler, reler e corrigir este trabalho com muita paciência.

Ao meu orientador professor Túlio Tibúrcio, pela maestria nas orientações, conduzindo pacientemente o meu desenvolvimento como pesquisadora.

À professora Joyce Carlo, pela solicitude em todos os momentos que necessitei de auxílio. Sua competência me ensina e inspira.

Ao professor Álvaro Tibiriçá, pela disposição em me auxiliar e pela enorme contribuição no desenvolvimento desta pesquisa.

Ao pessoal da casa da pós, Thaís, Rafaela, Sr. Ivanil, Gabriele e Isabele, por estarem sempre presentes e compartilharem comigo todo este período.

Aos meus anjos da guarda, Ítalo, Ronaldo, Guilherme e Elton, cujos recursos e tempo somaram-se aos meus nesta consecução.

Aos membros da banca examinadora, que gentilmente aceitaram participar e contribuir para a avaliação, aperfeiçoamento e conclusão desta pesquisa.

À FAPEMIG pela concessão da bolsa de estudos, viabilizando meu treinamento e o desenvolvimento desta pesquisa.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	v
LISTA DE QUADROS.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	ix
RESUMO.....	x
ABSTRACT	xi
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivo Geral	3
1.1.2 Objetivos Específicos	3
1.2 Estrutura do Trabalho.....	4
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	5
2.1 Edifícios Inteligentes.....	5
2.2 Fachadas Inteligentes.....	7
2.3 Fachadas Duplas.....	9
2.3.1 Classificação das Fachadas Duplas	11
2.3.2 Componentes de Fachadas Duplas.....	14
2.3.3 Estudos de Caso de edifícios com fachadas duplas	17
2.3.4 Avaliação de desempenho de fachadas duplas.....	23
2.4 Parâmetros para análise de desempenho da ventilação em ambientes com fachada dupla.....	27
2.4.1 Velocidade do ar X Temperatura do ar	27
2.4.2 Taxa de renovação de ar	29
2.5 Caracterização do clima tropical de altitude.....	29
2.5.1 Clima tropical e clima tropical de altitude	30
2.5.2 Clima da cidade de Viçosa MG.....	31
2.6 Simulação computacional.....	33
2.6.1 Simulação computacional de Fachadas duplas	34
2.7 Contribuições da revisão de literatura para a pesquisa.....	37
3 METODOLOGIA	39
3.1 Descrição geométrica do modelo base para simulação	39
3.2 Programas computacionais e os procedimentos para as simulações ..	41
3.2.1 Modelagem e simulação no programa ENERGYPLUS.....	42
3.2.2 Modelagem e simulação no programa ANSYS CFX - CFD	44
3.2.3 Testes de validação para o programa CFD	47
3.3 Análise de sensibilidade da variável ‘Temperatura da camada externa da fachada’	50
3.4 Definição de casos representativos das condições climáticas do clima tropical de altitude	52
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1 Testes de validação do modelo CFD	56
4.1.1 Teste de refinamento de malhas	56

4.1.2	Teste de coerência com modelo analítico.....	58
4.2	Análise de sensibilidade da temperatura da camada externa da fachada dupla	60
4.2.1	Trajetória e velocidade do ar nos modelos	61
4.2.2	Determinação da vazão de ar em função da diferença de temperatura entre o ar da atmosfera e a camada externa da fachada dupla	65
4.2.3	Vazão de ar pelas aberturas do ambiente com fachada dupla.....	66
4.2.4	Velocidade média do ar no ambiente em função de sua vazão nas aberturas	70
4.2.5	Necessidade de ventilação segundo a Carta Psicrométrica de Givoni e os valores encontrados para o ambiente com fachada dupla	72
4.3	Resultados para diferentes pavimentos.....	73
4.4	Análise dos casos de inverno e verão para o clima tropical de altitude	74
4.4.1	Inverno	75
4.4.2	Verão.....	80
5	CONCLUSÕES.....	85
5.1	Reflexões	85
5.2	Resumo de resultados.....	86
5.3	Contribuições da pesquisa	87
5.4	Limitações do trabalho.....	87
5.5	Indicações para trabalhos futuros.....	88
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
	ANEXOS	95

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fábrica com fachada dupla. Giengen, Alemanha.....	10
Figura 2 – (a) Esquema Fachada Box Window. Fonte: a autora. (b) Edifício Print Media Academy. Heidelberg, Alemanha. Fonte: POIRAZIS, 2006.....	12
Figura 3 – (a) Esquema Shaft Box Facade. Fonte: a autora. (b) - Edifício ARAG 2000 Tower. Düsseldorf, Alemanha. Fonte: www.hochtief.com.....	13
Figura 4 – (a) Esquema Corridor Facade. Fonte: a autora. (b) – Edifício Debis Headquarters. Berlim, Alemanha. Fonte: www.architecturenotes.com.....	13
Figura 5 – (a) Esquema Multi Storey Facade. Fonte: a autora. (b) - Edifício Victoria Life Insurance. Sachsenring, Alemanha. Fonte: POIRAZIS, 2006.....	14
Figura 6 – Gráfico Zona de bem estar para valores da temperatura do ar local e velocidade do ar. Fonte: Roedler (1957, citado por Macintyre, 2008).....	28
Figura 7 – Diagrama psicrométrico para países de clima quente. Fonte: adaptado de Givoni (1992).....	29
Figura 8 - Mapa mundial de classificação climática de Koppen-Geiger. Fonte: PEEL <i>et al.</i> (2007).....	30
Figura 9 - Mapa Tipos de clima no Brasil. Fonte: adaptado de ROSS, 2005.....	31
Figura 10 - Mapa de Minas Gerais, com a localização de Viçosa.	32
Figura 11 – Frequência de ocorrência das horas que em estratégias de ventilação são necessárias, em relação ao ano todo. Fonte: GUIMARÃES; CARLO, 2011.....	33
Figura 12 – Fachada dupla: geometria do modelo para simulação.....	40
Figura 13 – Modelo para simulação no programa EnergyPlus.....	43
Figura 14 – Modelos da geometria: (a) do domínio externo; (b) domínio interno.	45
Figura 15 – Exemplo de malhas geradas: (a) do domínio externo; (b) do domínio interno.	46
Figura 16 – Exemplo do modelo configurado no ANSYS CFX PRE.	47
Figura 17 – Detalhe da geometria com destaque para a face interna da camada externa da fachada.	51
Figura 18 – Processo para determinação das condições de contorno para extremos mínimo e máximo para verão e inverno.....	54
Figura 19 – Esquema de apresentação dos resultados.	55
Figura 20 – Resultados com refinamento da malha do domínio externo: (a) menos refinada e (b) mais refinada.....	57
Figura 21 – Resultados com refinamento da malha próxima da cavidade, com tamanho do elemento de (a) 0,07m e (b) 0,056m.	57
Figura 22 - Resultados com refinamento da malha do domínio interno, com tamanho do elemento de: (a) 0,128m, (b) 0,160m, (c) 0,200m e (d) 0,250m.	58

Figura 23 – Vetores de velocidade no modelo em corte para visualização da trajetória do ar para camada externa: (a) modelo 1 (15°C) e (b) modelo 8 (35°C).	61
Figura 24 - Visualização de contornos de velocidade no modelo em planta baixa para diferentes temperaturas da camada externa: (a) 15°C, (b) 17°C, (c) 20°C e (d) 23°C.	62
Figura 25 – Visualização de contornos de velocidade no modelo 5 em planta baixa.	63
Figura 26 – Visualização de contornos de velocidade no modelo em planta baixa para diferentes temperaturas da camada externa: (a) 27°C, (b) 30°C, (c) 35°C e (d) 40°C.	64
Figura 27 - Vazão em função da raiz da diferença de temperatura.....	66
Figura 28 – Frequência de ocorrência de intervalos de diferença de temperatura entre a camada externa da fachada e o ar da atmosfera.....	66
Figura 29 - Vazão calculada para cada estação do ano em (a) gráfico de dispersão e (b) <i>Box Plot</i>	67
Figura 30 - Médias mensais dos totais diários da radiação incidente na fachada norte.	68
Figura 31 – Vazão de ar pelas aberturas do modelo em função da radiação incidente na fachada norte para o ano todo.	69
Figura 32 – Frequência de ocorrência de intervalos de taxa de renovação de ar no ambiente interno.	69
Figura 33 – Correlação da velocidade média do ar no ambiente interno com a vazão de ar pelas aberturas.	70
Figura 34 - Velocidade do ar encontrada para os períodos de outono e inverno e primavera e verão.	71
Figura 35 – Gráfico <i>box plot</i> com vazões para os momentos do ano em que a temperatura do ar externo é maior que 27°C e/ou a umidade relativa do ar é maior que 80%.	73
Figura 36 – Vazões obtidas para cada pavimento.	74
Figura 37 - Gráfico com frequência de ocorrência das temperaturas da camada externa da fachada dupla para os períodos de inverno e verão.	75
Figura 38 – Frequência de ocorrência dos momentos do dia que ocorrem as temperaturas extremas (a) mínimas e (b) máximas de inverno.	76
Figura 39 – Vetores de velocidade em corte para visualização da trajetória do ar nos modelos extremos de inverno: (a) mínimo e (b) máximo.	77
Figura 40 – Contornos de (a) velocidade e (b) de temperatura para um plano horizontal para o caso extremo mínimo de inverno.	78
Figura 41 – Contornos de (a) velocidade e (b) de temperatura para um plano horizontal para o caso extremo máximo de inverno.	78

Figura 42 - Plotagem de velocidade e temperatura para os casos de inverno no gráfico de Roedler.....	79
Figura 43 – Frequência de ocorrência dos momentos do dia que ocorrem as temperaturas extremas (a) mínimas e (b) máximas de verão.	81
Figura 44 - Vetores de velocidade em corte para visualização da trajetória do ar nos modelos extremos de inverno: (a) mínimo e (b) máximo.....	81
Figura 45 - Contornos de (a) velocidade e (b) de temperatura para um plano horizontal para o caso extremo mínimo de verão.....	82
Figura 46 - Contornos de (a) velocidade e (b) de temperatura para um plano horizontal para o caso extremo máximo de verão.....	83
Figura 47 – Plotagem de velocidade e temperatura para os casos de verão no gráfico de Roedler.....	83

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Estudos de caso de edifícios com fachadas duplas.	18
Quadro 2 - Detalhes da modelagem no EnergyPlus.	43
Quadro 3 - Características das condições de contorno utilizadas nas simulações.	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos materiais inseridos no modelo para simulação. ...	43
Tabela 2 – Características geométricas dos domínios externos modelados.	48
Tabela 3 – Modelos para teste de refinamento de malha.	49
Tabela 4 - Características dos modelos para a análise de sensibilidade de variáveis para o método 1.	51
Tabela 5 – Especificações dos modelos para o teste de análise de sensibilidade de variáveis para altura da cavidade.	52
Tabela 6 – Dados de vazão encontrados nos testes de refinamento de malhas.	56
Tabela 7 – Vazões de ar pelas aberturas obtidas pelo programa CFD e calculada pela equação que trata da vazão por efeito chaminé para temperatura da camada externa < temperatura do ar da atmosfera.	59
Tabela 8 – Vazões de ar pelas aberturas obtidas pelo programa CFD e calculada pela equação que trata da vazão por efeito chaminé para temperatura da camada externa >= temperatura do ar da atmosfera.	59
Tabela 9 - Especificações dos modelos para o teste de análise de sensibilidade de variáveis.	61
Tabela 10 – Vazão de ar extraídos dos resultados das simulações.	65
Tabela 11 – Valores de vazão e velocidade média do ar no ambiente interno. ..	71
Tabela 12 – Valores usados como condições de contorno: casos extremos.	75
Tabela 13 - Resultados numéricos obtidos pela simulação para os casos extremos mínimo e máximo de inverno.	80
Tabela 14 - Resultados numéricos obtidos pela simulação para o caso extremo máximo de verão.	84

RESUMO

BARBOSA, Sabrina Andrade, MSc., Universidade Federal de Viçosa, abril de 2012. **Fachadas duplas em clima tropical de altitude: análise do potencial de ventilação para ambientes por meio de simulação computacional.** Orientador: Túlio Márcio de Salles Tibúrcio. Coorientadores: Joyce Correna Carlo e Álvaro Messias Bigonha Tibiriçá.

Este trabalho buscou investigar o potencial da fachada dupla na ventilação de ambientes no clima tropical de altitude. Foram estudadas as classificações e os principais componentes das fachadas duplas, além de pesquisados os parâmetros para análise do desempenho de ventilação nos ambientes construídos. Foi escolhido um modelo de ambiente com fachada dupla para a realização das simulações computacionais, em que foram usados os programas EnergyPlus e Ansys CFX (CFD – *Computer Fluid Dynamics*). As condições climáticas utilizadas foram da cidade de Viçosa MG, cujo clima é o tropical de altitude. O potencial da ventilação no ambiente foi analisado a partir da relação entre a temperatura do ar da atmosfera e a temperatura superficial da camada externa da fachada. Com os resultados de vazão obtidos na simulação de nove situações, foi possível obter uma correlação entre diferenças de temperaturas e a vazão nas aberturas para um ano típico. Além disso, foram simulados quatro casos que representam os instantes em que a camada externa da fachada possui temperaturas extremas nos períodos de inverno e verão. Verificou-se que o uso da fachada dupla pode ser benéfico para o aumento da taxa de ventilação natural no ambiente construído, confirmando seu potencial para uso em climas tropicais de altitude. O modelo estudado possui maior potencial de ventilação nos períodos mais frios do ano. A nebulosidade presente nos dias de verão e de primavera pode ser responsável pela redução da incidência de radiação na fachada, mantendo a temperatura do ar da cavidade próxima a do ar externo e, conseqüentemente, gerando menos ventilação no ambiente.

ABSTRACT

BARBOSA, Sabrina Andrade, MSc., Universidade Federal de Viçosa, April, 2012. **Double skin facades in highland tropical climate: analysis of the potential of ventilation to environments by computer simulation.** Adviser: Túlio de Márcio Salles Tibúrcio. Co-advisers: Joyce Correna Carlo and Álvaro Messias Bigonha Tibiriçá.

This work investigates the potential of the double skin facade on ventilation in an environment in a highland tropical climate. The classifications and components of double skin facades were studied and the parameters for ventilation performance analysis of built environments were investigated. A double skin facade environment model was defined for computational simulations, which used the software EnergyPlus and Ansys CFX (CFD). The weather file used was the one from the city of Viçosa MG, which is a highland tropical climate. The ventilation potential in the environment was evaluated from the relationship between the air temperature of the atmosphere and the outer surface temperature of the facade. The results obtained in the flow simulation of nine models, allowed to obtain a correlation between these temperatures and the flow into the openings for the full year. In addition, four cases were simulated representing the times that the outer facade has higher and lower temperatures during winter and summer. It was found that the double skin facade can be beneficial for the built environment, confirming its potential to create natural ventilation in buildings in highland tropical climate. The model tested has higher potential for ventilation during the colder periods of the year. The present haziness in spring and summer days may be responsible for reducing the incidence of solar radiation on the facade, maintaining the air cavity temperature close to the external air temperature and therefore generate less ventilation in the environment.

1 INTRODUÇÃO

As pessoas passam cerca de 90% do tempo dentro de edifícios. A qualidade desses ambientes afeta diretamente o bem estar e a satisfação do usuário, que estão relacionados à produtividade no trabalho e ao contentamento no modo de morar (CROOME, 2004). Para o mesmo autor, o usuário deve ser considerado como o ponto chave para instituir os edifícios inteligentes. Essas edificações incorporam inovações na arquitetura e procuram por melhoria nas técnicas construtivas, visando o melhor desempenho dos ambientes.

Dentro dessa grande área de estudo, há diferentes ramos de pesquisa que focam nos sistemas da edificação separadamente. Uma dessas disciplinas trata do estudo de fachadas e sua relação com o desempenho da edificação. Seguindo a mesma abordagem dos edifícios inteligentes, os estudos sobre as técnicas construtivas de fachadas geraram as 'fachadas inteligentes'. Gilder e Croome (2010) sugerem que é interessante aproveitar os estudos sobre o espaço construído, no desenvolvimento de fachadas inovadoras que visam questões que minimizam os efeitos negativos sobre o ambiente. No projeto de edifícios inteligentes, a fachada é o limite entre os ambientes internos e externos. Ela é, portanto, um moderador de fluxos, ajustando os ganhos e perdas desses fluxos para o interior do edifício (NIKOLAOU; KOLOKOTSA; STAVRAKAKIS, 2004).

Baldinelli (2009) defende que uma configuração de fachada que tem se tornado um importante elemento arquitetônico e que usa de sistemas solares passivos, tratando-se de um sofisticado sistema de regulação, é a fachada dupla. Segundo o mesmo autor, essa tipologia é resultado de um movimento arquitetônico que presta atenção à estética, mas que está associada a outras vantagens como redução no consumo relativo a aquecimento e refrigeração, bom nível de isolamento acústico e maior proteção contra a poluição do ar.

O uso de fachadas duplas é mais popular em edifícios de arranha-céus na Europa e a maioria das pesquisas são feitas principalmente em países com condições de clima temperado (WONG; PRASAD; BEHNIA, 2008). Segundo Ochoa e Capeluto (2008a), as mudanças econômicas em regiões quente-árida e quente-úmida têm produzido um *boom* na construção, que se caracteriza por incorporar inovação como uma forma de mostrar modernidade. A aplicação de soluções desenvolvidas para climas frios gera alto consumo energético e problemáticas condições de conforto interno em climas quentes.

Conforme argumentado por Ochoa e Capeluto (2008a), a fachada inteligente não é apenas um instrumento para reduzir o consumo de energia, mas também para fornecer conforto ao usuário de acordo com demandas do clima. Porém, de acordo com os mesmos autores, atualmente, a maioria das fachadas inteligentes em uso está alocada em regiões predominantemente frias. Mas, a acelerada demanda por modernos edifícios em regiões de climas quentes, a nova consciência global de energia e a rápida transferência tecnológica, levam a pensar que as fachadas inteligentes não podem ser apenas copiadas. Seu comportamento deve satisfazer requisitos específicos do clima onde serão executadas (OCHOA; CAPELUTO, 2008a). Assim, várias pesquisas sobre o desempenho de fachadas têm sido realizadas em climas moderados. Contudo, pouco se sabe sobre o desempenho das configurações de fachada dupla em outros tipos de climas. (HAMZA, 2008).

Cabe observar a dificuldade de encontrar trabalhos e exemplos na arquitetura brasileira relacionados às fachadas duplas. Marcondes (2010) revela que o edifício Cidade Nova, concluído em 2008 no Rio de Janeiro, foi o primeiro a apresentar o sistema. A autora explica que as janelas da camada interna não se abrem para ventilação natural, nem no período noturno, usando o condicionamento de ar em todo o tempo de uso. Percebe-se que a falta de conhecimento sobre o tema impede a exploração do potencial de ventilação dessa tipologia de fachada, necessária no clima (tropical) da cidade do Rio de Janeiro. Fica clara a cópia de uma configuração de fachada dupla sem a devida adequação ao clima. A escassez de exemplos de edifícios com fachadas duplas no país e o incentivo a estudos que aproveitam as condições climáticas do Brasil, apontam a necessidade de mais avaliações sobre o tema.

Harrison e Boake (2003) sugerem que devem ser considerados alguns critérios na avaliação dos edifícios com fachada dupla e recomendam a avaliação do sistema quanto à sua eficácia no controle da radiação solar, os tipos e formas de controle dos dispositivos de aberturas e de sombreamento, uso da iluminação natural no ambiente interno, valor do isolamento térmico do sistema, ventilação, adaptabilidade para diferentes orientações solares, custos, considerações climáticas, dentre outros. Zhou e Chen (2010) acreditam que a aplicação da fachada dupla possui um futuro promissor em locais onde há períodos de verão quente e inverno frio. Para os autores, seu uso depende dos meios de ventilação escolhidos na cavidade, a localização do sistema de

sombreamento, o material dos vidros das camadas e do dimensionamento da cavidade.

Diante da necessidade de adaptação de projetos de fachadas duplas de climas frios para climas quentes, questiona-se sobre as adequações necessárias ao desenvolvimento dessa tipologia em regiões de clima quente. Dentro deste tema, outros questionamentos podem contribuir para direcionar os ajustes necessários à implantação da fachada dupla no clima tropical. Avaliar o controle da radiação solar pela fachada, verificar os materiais a serem usados ou examinar a forma de implantação dos dispositivos de sombreamento são exemplos de pesquisas que podem complementar as diretrizes necessárias às adaptações de projetos de fachadas duplas para climas quentes.

Uma investigação necessária, neste caso, é verificar se a fachada dupla é capaz de promover ventilação adequada em uma edificação localizada no clima tropical de altitude. Diante disso, surge a seguinte pergunta:

- A fachada dupla possui potencial para ventilar naturalmente uma edificação no clima tropical de altitude?

Este trabalho procura contribuir com os estudos de fachadas duplas para um clima com verões quentes e úmidos e invernos secos com quedas pontuais de temperatura, mesmo em locais com baixa intensidade de vento, verificando sua influência na ventilação natural das edificações. Para o desenvolvimento deste trabalho, foram realizadas simulações computacionais que têm como vantagens os baixos custos em relação aos experimentos *in loco* e a possibilidade de variar diversos parâmetros.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Investigar o potencial de uso da fachada dupla como elemento promotor de ventilação natural em ambientes no clima tropical de altitude.

1.1.2 Objetivos Específicos

Para atender ao objetivo geral, pretende-se, como objetivos específicos:

- a. Identificar na literatura configurações de fachadas duplas, apresentando seus parâmetros e elementos;
- b. Propor um modelo de ambiente com fachada dupla para simulação computacional;

- c. Identificar métodos de análise das condições de ventilação no modelo com fachada dupla;
- d. Identificar programas de simulação computacional para fachadas duplas;
- e. Analisar o modelo simulado do ambiente com fachada dupla.

1.2 Estrutura do Trabalho

A dissertação é constituída de cinco capítulos. O primeiro apresenta uma introdução sobre o assunto, caracterizando o problema estudado e descrevendo os objetivos buscados.

O segundo capítulo apresenta revisão de literatura referente à inteligência em edifícios, com foco em fachadas inteligentes, especificamente as fachadas duplas, com descrição técnica, classificações e efeitos que provocam nos edifícios. Este capítulo aborda também o contexto climático para implantação da fachada dupla e as ferramentas de simulação utilizadas no desenvolvimento do trabalho.

A metodologia da pesquisa é apresentada no capítulo 3, que identifica o modelo e o processo de simulação usando os programas de análise térmica e de ventilação. Além disso, são apresentados os testes de validação realizados e o método para definição de momentos representativos do clima estudado.

No quarto capítulo são apresentados os resultados e discussões alcançados ao longo do trabalho, com destaque para os resultados que avaliaram o potencial da ventilação do ambiente com fachada dupla para o clima tropical de altitude. Neste capítulo são apresentados ainda os resultados obtidos a partir dos modelos representativos de inverno e verão no clima estudado.

No último capítulo são apresentadas as conclusões, limitações e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo apresenta a revisão de literatura relevante para esta pesquisa, expondo os principais conceitos teóricos necessários ao desenvolvimento do trabalho.

A discussão se inicia com uma contextualização do tema 'Edifícios Inteligentes'. A seguir é abordada a evolução das fachadas nas edificações procurando entendê-las como um importante elemento nos edifícios inteligentes capazes de dar respostas às mudanças impostas pelo ambiente exterior e pela ocupação interna. São apresentadas as definições e classificações de fachadas duplas, objeto de estudo deste trabalho. A seção seguinte apresenta uma descrição técnica das fachadas duplas, com destaque para alguns elementos que as compõe. O quadro apresentado em seguida reúne casos de fachadas duplas que deram subsídios para a definição da geometria simulada neste trabalho. Em seguida, são apresentados alguns trabalhos que avaliaram o desempenho das fachadas duplas, destacando suas implicações quanto às propriedades térmicas e de ventilação.

As considerações sobre o clima local têm o objetivo de limitar a análise do desempenho da fachada dupla para um clima específico. Por fim, é apresentado o potencial da simulação computacional para avaliação de desempenho das fachadas duplas.

2.1 Edifícios Inteligentes

De acordo com Tibúrcio (2007), cada vez mais a tecnologia invade os edifícios sob variadas formas, com as mais diversas técnicas e métodos, e sempre com o propósito de melhorar a qualidade do ambiente em que vive o usuário. As últimas décadas têm testemunhado um amadurecimento na preocupação e interesse no desempenho das edificações (ALWAER; CROOME, 2010). As mudanças nos edifícios trazem alterações em diversos sistemas construtivos, e nesse contexto de transformação, procura atender às expectativas de melhoria em seu desempenho.

Segundo Kaklauskas *et al.* (2010), pesquisas mostram que vários cientistas têm conseguido bons resultados em diferentes áreas relacionadas às inovações nos ambientes construídos: estruturas e materiais, poluição e saúde, iluminação, aquecimento, sistemas de serviços multimídia, materiais, eficiência energética, modelagem, temperatura, sistemas mecânicos, sustentabilidade,

comparação dos impactos de estratégias passivas e ativas, avaliação dos edifícios com base no nível de integração dos sistemas de serviços, infraestruturas de comunicação, voz, sensores, dentre outros.

Para Wong, Li e Wang (2005) o ambiente edificado afeta o conforto dos usuários no trabalho, que por sua vez, influencia em sua produtividade e satisfação. O desenvolvimento da tecnologia da informação, a exigência cada vez maior sobre o conforto ambiental e a necessidade de aumento do controle dos usuários sobre o ambiente edificado, estimularam o surgimento do conceito de Edifício Inteligente, segundo os mesmos autores.

A preocupação com o conforto e a produtividade dos usuários tem levado muitos pesquisadores a investigar os edifícios e buscar formas inteligentes de dar soluções aos problemas que afetam os usuários. Dentro dessa linha, os edifícios inteligentes buscam na tecnologia, uma forma de contribuir com a melhoria da qualidade do ambiente edificado.

O termo 'Edifícios Inteligentes' apareceu inicialmente no início da década de 1980 e tem evoluído com diferentes ênfases, impulsionado principalmente pelo desenvolvimento de tecnologias e pelas necessidades de mudança no ambiente construído. Em 1985, as definições de edifícios inteligentes estavam relacionadas às edificações que incorporavam inovações e tecnologia e que eram capazes de controlar algumas de suas funções automaticamente. Menos de uma década depois, os edifícios inteligentes eram considerados como aqueles que tinham a capacidade promover conforto e segurança aos usuários. No início da década de 2000, a compreensão dos edifícios inteligentes combinava aspectos estéticos, flexibilidade e qualidade do espaço. Além disso, estes edifícios permitiam o controle da temperatura do ar pelos usuários e estavam relacionados às edificações que possuíam tecnologias em comunicações e controle das informações (CROOME, 2004).

Segundo Wigginton e Harris (2002) diferentes órgãos e profissionais têm entendimentos diferentes sobre a definição do termo Edifício Inteligente. O Instituto de Edifícios Inteligentes dos Estados Unidos o define como aquele que fornece um ambiente produtivo e um bom custo-benefício por meio da otimização de quatro elementos básicos, que incluem estruturas, sistemas, serviços e gestão e as inter-relações entre eles. Por outro lado, o grupo europeu de Edifícios Inteligentes define um edifício inteligente como aquele que cria um ambiente que maximiza a eficácia da ocupação do edifício, enquanto permite a

gestão eficiente dos recursos com o mínimo de custos de instalações. A diferença indica, segundo os autores, que a definição do Reino Unido é mais focada nas necessidades dos usuários, enquanto a definição dos EUA está mais concentrada nas tecnologias.

Para Ochoa e Capeluto (2008b), o termo "inteligência" em edifícios pode ser considerado por arquitetos como aquele que possui a melhor solução de projeto, que sabe adaptar-se a cada situação. Os autores ponderam que esses recursos podem ser tanto automáticos ou manuais e não necessariamente devem incluir componentes eletrônicos sofisticados. Segundo eles, o termo *passive design* (projeto passivo) refere-se a uma série de estratégias de projeto usadas pelo arquiteto para desenvolver o edifício de forma que ele que responda adequadamente às exigências climáticas e a outras necessidades contextuais. As estratégias passivas, quando projetadas corretamente, são consideradas pelos autores como precedentes do projeto inteligente.

Uma importante parte do edifício inteligente é a sua fachada, tanto do ponto de vista da imagem quanto do desempenho energético (OCHOA; CAPELUTO, 2008a). Para os autores, a envoltória não é apenas um complemento que reduz o consumo de energia, mas deve também promover conforto aos usuários de acordo com as demandas do clima.

2.2 Fachadas Inteligentes

Wigginton e Harris (2002) fizeram uma revisão sobre as melhores práticas relacionadas à inteligência nos edifícios. Os autores estenderam o estudo à inteligência da fachada. Eles entendem que a fachada inteligente é parte do edifício inteligente e refere-se aos elementos que desempenham a função de envolver o ambiente interior, o projeto e a construção, considerando que ela exerce potencial controle sobre o ambiente interior em termos de iluminação, calor, acústica, ventilação e qualidade do ar.

Os exemplos reunidos pelos autores mostraram que a fachada possui diferentes funções que influenciam na passagem de energia do ambiente externo para o interno e vice-versa. São elas:

- promoção e maximização da entrada de luz natural no ambiente;
- proteção solar;
- ventilação;
- captação do calor (por meio de coletores solares);

- atenuação de ruídos;
- geração de eletricidade (por meio de painéis fotovoltaicos);
- exploração de diferenças de pressão (provocando ventilação).

Recentemente, muitas pesquisas têm sido focadas na construção da fachada, que funciona como um filtro ambiental, formando uma pele em volta da edificação e controlando a influência do exterior sobre os ambientes internos. (MONNA; MASERA, 2010). Surge com isso o termo fachada inteligente. De acordo com Lee *et al.* (2002), uma fachada inteligente é um produto complexo que tem a capacidade de se autoajustar por meio de seus componentes (ativos ou passivos) às mudanças produzidas pelo entorno ou nos ambientes internos.

Monna e Maser (2010) confirmam o exposto e asseguram que a fachada inteligente pode ser definida pela sua capacidade de se adaptar a um ambiente variável. Inteligência pode estar relacionada ao desempenho de resposta da envoltória do edifício. A definição de fachadas inteligentes é descrita por Ochoa e Capeluto (2009) como aquelas que respondem dinamicamente às demandas colocadas pelo ambiente exterior e a ocupação interna, seguindo o consciente uso da energia e mantendo o conforto do usuário.

Assim, a arquitetura assiste a mudanças nos conceitos aplicados às fachadas, que se tornam cada vez mais inteligentes porque são capazes de detectar as condições do ambiente externo e se adaptar a elas. Portanto, a fachada inteligente difere da fachada “tradicional” na medida em que incorpora dispositivos cujo controle permite a adaptação da envoltória do edifício para funcionar como um moderador das condições externas.

Ochoa e Capeluto (2009) acrescentam ainda que há um grande número de elementos e configurações que podem ser considerados na escolha da fachada e dependem de parâmetros como orçamento, orientação solar, tamanho da janela e tipo de vidros.

Segundo Han *et al.* (2010), avanços importantes têm ocorrido nas pesquisas sobre as envoltórias das edificações e incluem sistemas que visam o alto desempenho da construção aliado à redução de custos. Entre os sistemas revisados pelo autor está o uso das janelas inteligentes e de materiais que promovam melhor isolamento térmico e maior entrada de luz natural no ambiente. Além disso, incluem uso de elementos que produzem calor e eletricidade, como o painel fotovoltaico, uso de brises e persianas manuais ou automatizadas, implantação de parede verde, dentre outros.

Uma das configurações possíveis de fachadas inteligentes que pode contribuir para o melhor desempenho do ambiente interno da edificação é denominada Fachada Dupla, que segundo Baldinelli (2009), pode revelar-se extremamente atraente e promissora.

2.3 Fachadas Duplas

Projetos conscientes sobre a preservação do meio ambiente e sobre a necessidade da economia de energia contribuem para a busca do desenvolvimento de novas tecnologias de fachadas. Nessa busca, as fachadas duplas são regularmente apresentadas como soluções valiosas a serem utilizadas, exprimindo os desejos da arquitetura atual (SAELENS; ROELS; HENS, 2008).

De acordo com Gratia e Herde (2007), a principal razão arquitetônica para o uso da fachada dupla está relacionada à transparência, pois suas características permitem o contato próximo dos usuários com o entorno. Hamza (2008) complementa que os vidros transparentes são normalmente usados na camada exterior para manter a transparência na aparência dos edifícios.

A fachada dupla é formada por um elemento construtivo que está integrado ao edifício com o objetivo de conferir a ele várias propriedades que podem aumentar seu desempenho. O princípio básico de seu sistema está relacionado à adição de uma camada externa, formando uma cavidade entre ela e a fachada interior. Essa camada externa é construída com painéis de vidro montados sobre uma grade estrutural (HILMARSSON, 2008). Alguns autores consideram que as duas camadas da fachada dupla devem ser de vidro, como Harrison e Boake, (2003) que a descreveram como um par de vidros separados por um corredor de ar. Para Streicher *et al.* (2005) a tendência é que se acabem as paredes de alvenaria com suas muitas partes sólidas e é necessário que se controle sua influência sobre as trocas de energia com soluções inovadoras. Nos projetos que envolvem fachada de vidro, é preciso considerar os efeitos térmicos procedentes do uso deste material, principalmente em regiões com climas mais quentes.

O espaço intermediário entre os vidros funciona como isolamento contra extremos de temperatura, ventos e som. Geralmente, são colocados alguns dispositivos de proteção solar entre as duas camadas. Os elementos podem ser organizados de diferentes formas, com relação ao número de permutações e combinações das três camadas (HARRISON; BOAKE, 2003). De maneira

simplificada, entende-se a fachada dupla como aquela que possui múltiplas camadas: uma pele externa, um espaço intermediário e uma pele interna (WONG; PRASAD; BEHNIA, 2008).

Fachada dupla não é uma tipologia nova, pois, segundo Wong, Prasad e Behnia (2008), foi iniciada há séculos, sendo que há registro de uma fachada dupla que foi implantada em 1903, em uma fábrica em Giengen, Alemanha (Figura 1). Na Rússia, Moisei Ginzburg experimentou o uso de fachadas duplas em edifícios de habitações em 1928 (UUTTU, 2001). No entanto, Hilmarsson (2008), pondera que poucas construções de fachada dupla foram feitas até a poucas décadas. No início dos anos 1990, esse tipo de construção ganhou importância quando os arquitetos começaram a ter um interesse maior em edifícios com eficiência energética, política que cresceu nesse setor.



Figura 1 - Fábrica com fachada dupla. Giengen, Alemanha.

Fonte: www.facadesconfidential.blogspot.com

Segundo Zhou e Chen (2010) trata-se de uma técnica desenvolvida para o clima mais frio. Ela ganhou ampla aceitação e aplicação na Europa, América do Norte e Japão desde a década de 80. Porém, recentemente, com o rápido desenvolvimento econômico, novos edifícios com fachada dupla também apareceram nas zonas de verão quente e inverno frio na China, como por exemplo, em Xangai e Hangzhou. Nos últimos anos, a aplicação da fachada dupla ganhou popularidade na prática de construção moderna em todo o mundo, sendo que a maior quantidade de edifícios com essa técnica é encontrada no Norte da Europa, seguido pelo Japão.

2.3.1 Classificação das Fachadas Duplas

Com relação à classificação das fachadas duplas, diferentes considerações são encontradas na literatura. Elas são categorizadas pelo tipo da construção, origem, tipo de ventilação da cavidade intermediária, etc. Para Hamza (2008), as configurações implantadas nos edifícios variam na profundidade da cavidade, nos materiais utilizados em cada camada, na proporção de áreas de janelas em relação às de parede, na divisão do ar e nos materiais de sombreamento utilizados na cavidade.

Segundo Loncour *et al.* (2004), na literatura são encontradas muitas classificações de fachadas duplas e a maioria é essencialmente baseada nas características geométricas das fachadas. Os autores as classificaram levando em conta três critérios independentes:

- a) **Tipo de ventilação:** refere-se à origem da força que promove a ventilação entre as duas camadas. Elas se dividem em ventilação natural, mecânica e híbrida.
- b) **Divisão da fachada:** aborda como a cavidade é fisicamente dividida pelo pavimento, e divide-se em modulados, ou do tipo corredor e em múltiplos pavimentos.
- c) **Modos de ventilação da cavidade:** refere-se à origem e destino do fluxo de ar na cavidade.

Harrison e Boake (2003) consideram a existência de quatro tipologias básicas baseadas nos materiais que compõem as camadas:

- a) **The buffer facade:** consiste de dois vidros separados por uma cavidade de 25 cm a 75 cm. Ela foi desenvolvida inicialmente com vidros isolantes a fim de aumentar o isolamento acústico e térmico, sem reduzir a quantidade de luz que entra no edifício.
- b) **The extract-air facade:** possui a camada interna feita com vidro simples e a pele externa de vidro isolante, que impede a perda de calor da cavidade. Esse sistema é usado onde a ventilação natural não é possível (em locais de excesso de ruído, fumaça ou vento, por exemplo). O ar presente na cavidade se aquece e, com o uso de ventilação mecânica é conduzido até topo.
- c) **The twin-face facade:** o sistema é composto pela camada interna construída com alvenaria e a externa é feita de vidro simples (que tem a função de proteger os dispositivos de sombreamento da cavidade). Essa tipologia

oferece isolamento térmico para minimizar a entrada de calor para dentro da edificação. Ela permite aberturas na camada externa, melhorando a ventilação.

d) **The hybrid facade:** essa tipologia combina uma ou mais características básicas dos sistemas apresentados acima, criando um novo tipo.

Dentre as várias formas de classificação das fachadas duplas, a mais comum encontrada na literatura refere-se à determinada por Oesterle *et al.* (2001, citado por Poirazis, 2006 e Hilmarsson, 2008) que identificaram 4 diferentes formas de fachadas duplas: *Box Window*, *Shaft – Box Facade*, *Corridor facades* e *Multi Storey Facade*. Estas são analisadas pelo tipo da cavidade intermediária e a ventilação desejada:

a) **Box Window:** nessa tipologia, a pele externa é formada por folhas de vidro fixadas em cada pavimento, com aberturas que permitem a circulação de ar dentro da cavidade (Figura 2a). Neste caso, as divisões horizontais e verticais dividem a fachada em caixas menores e independentes. Essa forma é para situações onde há alto nível de ruído externo ou ainda em casos de reformas de edifícios antigos, no intuito de melhorar seu desempenho. Um exemplo dessa categoria é o edifício alemão Print Media Academy, apresentado na Figura 2b.

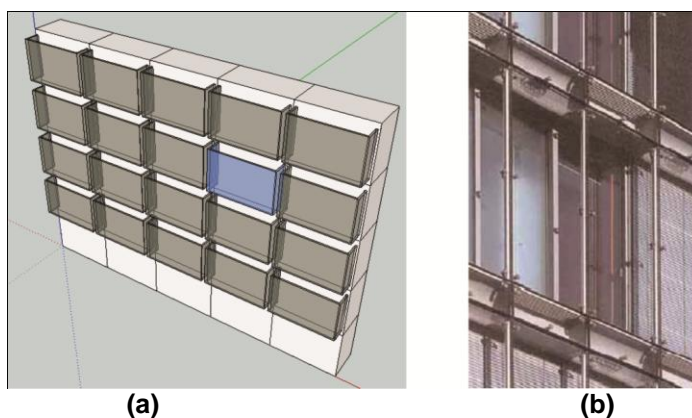
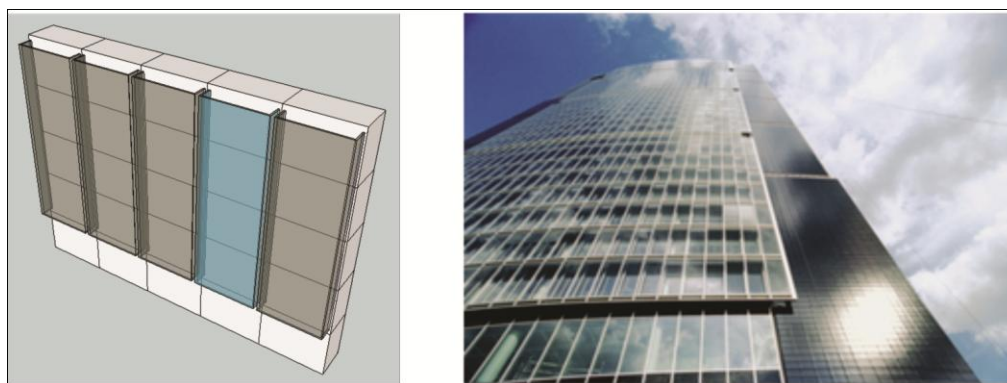


Figura 2 – (a) Esquema Fachada Box Window. Fonte: a autora. (b) Edifício Print Media Academy. Heidelberg, Alemanha. Fonte: POIRAZIS, 2006.

b) **Shaft – Box Facade:** neste caso, a pele externa possui poucas aberturas a fim de explorar o resultado do efeito chaminé, devido à elevação de temperatura do ar da cavidade. A Figura 3a mostra um esquema desse tipo de fachada dupla e a Figura 3b apresenta o Edifício Arag 2000 Tower que utiliza esse tipo de fachada.

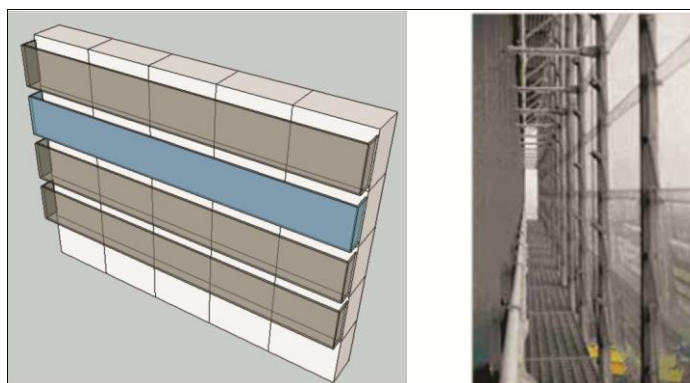


(a)

(b)

Figura 3 – (a) Esquema Shaft Box Facade. Fonte: a autora. (b) - Edifício ARAG 2000 Tower. Düsseldorf, Alemanha. Fonte: www.hochtief.com.

c) **Corridor Facades:** é dividida apenas horizontalmente em cada piso e a cavidade é aberta apenas horizontalmente, como no Edifício Debis Headquarters (Figura 4b). A entrada e saída de ar pelas aberturas na pele externa devem ser situadas próximas à laje de cada pavimento, sendo que a ventilação pode se apresentar de forma natural ou mecânica. Neste caso, devem ser tomados cuidados para evitar que haja transmissão do som de uma sala para outra através do corredor.



(a)

(b)

Figura 4 – (a) Esquema Corridor Facade. Fonte: a autora. (b) – Edifício Debis Headquarters. Berlim, Alemanha. Fonte: www.architecturenotes.com.

d) **Multi Storey Facade:** não há repartições horizontais ou verticais entre as duas peles. As aberturas estão situadas apenas no topo e base da cavidade, como mostrado na Figura 5a. Segundo o autor, essa tipologia é indicada para edifícios localizados em áreas de intenso ruído, já que não requer aberturas na camada externa. Um exemplo dessa categoria é o Edifício Victoria Life Insurance, conforme Figura 5b.

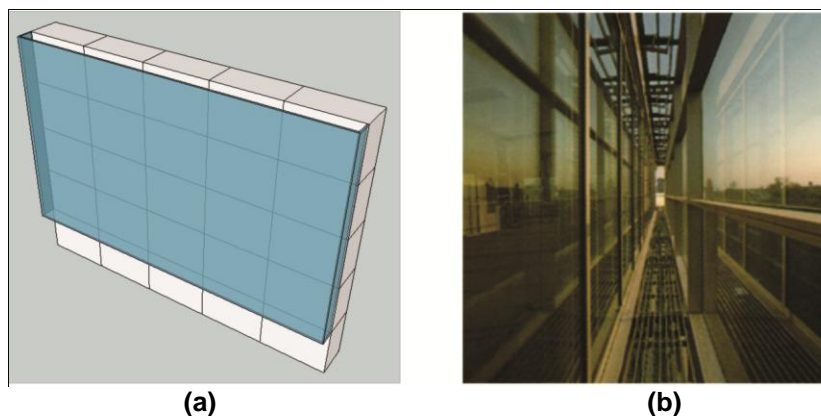


Figura 5 – (a) Esquema Multi Storey Facade. Fonte: a autora. (b) - Edifício Victoria Life Insurance. Sachsenring, Alemanha. Fonte: POIRAZIS, 2006.

2.3.2 Componentes de Fachadas Duplas

Esta seção trata da importância na escolha e dimensionamento de alguns elementos que compõem a estrutura da fachada dupla e que interagem entre si, influenciando no desempenho do sistema. Os elementos abordados são: dispositivos de sombreamento, as camadas da fachada e suas aberturas e dimensionamento da cavidade. Além desses, há outros parâmetros que precisam ser levados em consideração como o tipo de divisão da cavidade e os materiais usados nas camadas da fachada.

Dispositivos de sombreamento

Gratia e Herde (2004), destacam que uma das mais eficientes estratégias de resfriamento natural é o uso de brises. Nas simulações realizadas, para encontrar a melhor posição da veneziana dentro da cavidade, os autores usaram um edifício localizado na Bélgica (clima de grandes amplitudes térmicas e com alta umidade). Quando o brise é colocado muito perto da fachada interior, pode ocorrer um inadequado fluxo de ar em volta do elemento e o calor conduzido e irradiado para o interior pode aumentar. Assim, o brise deve ser localizado próximo ao painel externo com adequado canal para circulação nos dois lados. Com a apropriada localização e escolha criteriosa do tamanho dos brises, foi possível economizar até 14% de energia para condicionamento de ar no edifício.

Jiru, Tao e Haghghat (2011) realizaram simulações computacionais em uma célula-teste com fachada dupla para verificar a influência da posição (interior, meio e exterior) e da angulação (0°, 45°, 90°) dos brises na temperatura e distribuição de ar na cavidade. O modelo usou como condições de contorno

17°C para temperatura do ar exterior e 20°C para temperatura do ar interno. Segundo os autores, a presença de brises influencia nos coeficientes de transferência de calor, na temperatura e na distribuição e velocidade do ar da cavidade da fachada dupla. A modificação na posição dos brises tem mais efeito na distribuição da temperatura do ar do que as mudanças nas angulações.

A razão pela qual os dispositivos de sombreamento são colocados dentro da cavidade, relaciona-se às questões de proteção. As características e a posição do dispositivo influenciam no comportamento físico da cavidade, pois ele absorve e reflete a energia captada da radiação. Assim, a seleção do dispositivo de sombreamento adequado em cada caso deve ser feita após considerar a combinação entre o tipo das camadas, a geometria da cavidade e a estratégia de ventilação usada (STREICHER *et al.*, 2005).

A fachada dupla pode ter pouco sombreamento se os dispositivos não estiverem apropriadamente localizados, e os ganhos solares podem ser transferidos para dentro do edifício por meio da camada interna (ZHOU; CHEN, 2010).

Camadas da fachada e suas aberturas

Ao projetar uma fachada dupla é importante determinar o tamanho, o tipo e o posicionamento das aberturas nas camadas interior e exterior da fachada. O projeto das aberturas é crucial para determinação do fluxo de ar no interior do ambiente e, conseqüentemente na taxa de ventilação e no conforto térmico dos usuários (STREICHER *et al.*, 2005). Oesterle *et al.* (2001, citado por POIRAZIS, 2006) complementam que a eficácia da fachada dupla em termos de ventilação e iluminação é função dos tipos de aberturas.

Para Gratia e Herde (2004) o risco de superaquecimento, no verão, é evidente em fachadas duplas, mas pode ser minimizado com aberturas bem dimensionadas. Os mesmos autores, em 2007, testaram aberturas no topo e base da pele externa de um edifício na Bélgica e afirmam que a temperatura decresce até 18,4°C graças à ventilação causada pela circulação do ar quando a pele externa possui aberturas. Segundo os autores, a redução do consumo energético varia de 7,4% a 12,6% das cargas relativas ao resfriamento dos ambientes.

A forma e quantidade de aberturas nas camadas da fachada dupla influenciam no fluxo de ar que se move na cavidade e para o interior do ambiente, controlando as cargas térmicas que entram e saem. Além disso, as

aberturas podem permitir maior ou menor entrada de luz natural no edifício. Esses fatores influenciam no consumo energético e na qualidade climática do conjunto.

Dimensionamento da cavidade

A largura da cavidade pode variar em função do conceito aplicado, que implica em dimensões que variam desde 10 cm a mais de 2 m. Ela influencia nas propriedades físicas da fachada e também em sua manutenção (STREICHER *et al.*, 2005).

Yagoub e Stevens (2010) analisaram o caso de um edifício situado na área central de Abu Dhabi, com enfoque para o comportamento térmico da fachada dupla. A região caracteriza-se por altas temperaturas, intensa radiação solar e grande quantidades de tempestades de areia, o que impede a presença de aberturas na fachada. A cavidade simulada pelos autores tem largura de 0,83m e segundo eles, é possível conseguir confortáveis condições internas, mas é inevitável o alto consumo de energia com equipamentos dedicados a manter a temperatura na cavidade. Hamza (2008) também realizou pesquisas com a fachada dupla em clima quente e seco, porém projetou a largura da cavidade com 1m e argumentou que para o clima considerado, essa dimensão deve permanecer entre 0,60 e 1,0m. O edifício simulado por Gratia e Herde (2007), na Bélgica, possui 1,20m de largura na cavidade intermediária. Os autores testaram, além da localização dos brises na cavidade, suas cores (escuro e claro), introduzindo ainda a aberturas nas peles.

Torres *et al.* (2007) realizaram simulações para um edifício de seis pavimentos com fachada dupla situado em Barcelona, Espanha. O clima local é o mediterrâneo e caracteriza-se por invernos com chuvas frequentes e temperaturas amenas e verão quente com temperaturas que chegam a 30°C. Quatro larguras diferentes das cavidades foram simuladas: 40 cm, 60 cm, 80 cm e 100 cm; combinadas com três diferentes aberturas na camada externa. Segundo os autores, mantendo a área de abertura na camada exterior constante, tem-se que, com o aumento da largura da cavidade, a média de troca de volume de ar decresce em 32%, 49% e 59%, respectivamente. O aumento da profundidade da cavidade de 40 cm para 100 cm, mantendo sua área de abertura, pode elevar a temperatura do ar em 1,1%, no sexto pavimento. A cavidade de 40 cm de profundidade, juntamente com a camada externa com 15% de abertura, apresenta a menor exigência no consumo de energia para

resfriamento. Isso ocorre porque o volume de ar quente é extraído mais eficazmente da cavidade, pelo efeito chaminé. Os autores ponderam que este estudo indica efeitos de um clima exclusivo, sob específicas condições e seus resultados não podem ser adotados como referência para outros climas.






É possível perceber a grande disparidade na escolha da largura das cavidades pesquisadas pelos autores. Essa e outras escolhas relacionadas aos elementos e dimensionamentos dos componentes das fachadas duplas, provocam alterações nas configurações implantadas no edifício. A seção seguinte que apresenta alguns exemplos encontrados na arquitetura.


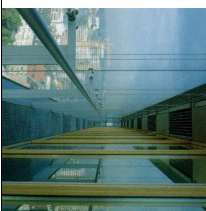



2.3.3 Estudos de Caso de edifícios com fachadas duplas



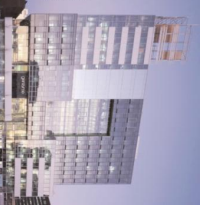



Um dos objetivos específicos desta pesquisa foi identificar configurações de fachadas duplas, apresentando seus parâmetros e elementos. O estudo gerou um quadro que permitiu um melhor entendimento sobre o tema 'fachadas duplas', apresentando as características dessa tipologia de fachada.

Esse quadro apresenta dados básicos do projeto como a data de conclusão da obra/fachada, o local em que está inserida e o projetista responsável. Além disso, dados técnicos construtivos como o número de pavimentos da edificação, a largura da cavidade, a forma de abertura da camada externa, o dispositivo de sombreamento usado e algumas observações específicas a respeito do caso. A penúltima coluna do Quadro 1 relaciona os casos com as classificações de Oesterle *et al.*, 2001 (citado por Poirazis, 2006 e Hilmarsson, 2008) e Harrison e Boake (2003) apresentadas na seção 2.3.1. Essa avaliação tem o objetivo de ajustar cada exemplo em uma determinada categoria, a fim de facilitar o entendimento das diferenças nos diferentes tipos de fachadas duplas. Alguns casos não se enquadram em nenhum dos grupos propostos pelos autores e aparecem com um traço. Os 16 casos escolhidos foram ordenados de forma cronológica, de acordo com a data da construção da segunda camada.

Quadro 1 - Estudos de caso de edifícios com fachadas duplas.

Estudo de caso	Nome/ Ano	Local	Projetista	Numero de pavimento	Largura da cavidade	Forma de abertura da camada externa	Dispositivo de sombreamento	Observações	Classificação: Oesterle et al. (2001) / Harrison e Boake (2003)	Imagem
Caso 1	GSW Headquarters/1991	Berlim, Alemanha	Sauerbruch e Hutton	22 pav.	1,0 m	Ao longo da fachada em forma de brises móveis verticais	Própria camada externa	Diminuição da necessidade de ventilação mecânica Controle manual ou mecânico Fachada dupla implantada 40 anos após construção	-	 Fonte: BODART; GRATIA, 2003
Caso 2	Edifício de Escritórios Suva/ 1993	Suva, Suíça	Herzog e De Meuron	5 pav.	1,0 m	Abertura ao longo da fachada em forma de brises móveis horizontais	Própria camada externa	Cavidade fechada: inibe a circulação do ar e aumenta a temperatura Cavidade aberta: permite circulação do ar Camada externa incorporada ao edifício antigo	-	 Fonte: POIRAZIS, 2006
Caso 3	Aula Magna/ 1996	Louvain-La-Neuve, Bélgica	Samyn e Partners	-	0,70m	Aberturas no topo e base automaticamente controladas	Cortinas venezianas controladas automaticamente e instaladas próximas à camada interior	Aquecimento e resfriamento realizados por ventilação mecânica As quatro fachadas possuem a segunda camada Aberturas internas somente para manutenção	<i>Multi Storey Façade</i>	 Fonte: POIRAZIS, 2006
Caso 4	Edifício Victoria Life Insurance/ 1996	Sachsensring, Alemanha	Thomas van den Valentyn e Tillmann, Köln	-	0,80m	Aberturas no topo e na base da fachada	Venezianas de alumínio	Inverno: as aberturas de ar na cavidade são fechadas Cuidado na selagem das camadas de vidros	<i>Multi storey Façade</i>	 Fonte: POIRAZIS, 2004
Caso 5	Debis Headquarters/ 1997	Berlim, Alemanha	Renzo Piano	21 pav.	0,70 m	Abertura ao longo da fachada por meio de painéis pivotantes	Plataforma de manutenção atua como brises horizontais	Camada externa controlada por ventilação e insolação Há ventilação mecânica para dias com temperaturas extremas	<i>Corridor Façade</i>	 Fonte: POIRAZIS, 2006

Caso 6	GlaxoWellcome House West/ 1997	Londres, Inglaterra	RJLM Architects	4 pav.	-	Não há aberturas na pele externa	Brises horizontais na cavidade	Redução da carga relativa à refrigeração Edifício totalmente condicionado Aberturas internas somente para manutenção	Sem aberturas na camada externa		Fonte: BODART; GRATIA, 2003
Caso 7	Stadtlor/ 1997	Frankfurt, Alemanha	Petziinka Pink e Partner	20 pav.	0,90 e 1,40m	Aberturas próximas ao piso e ao teto em cada pavimento	Situados 20 cm atrás da face externa	A tipologia evita que o ar viciado extraído de um piso entre no piso imediatamente acima Painel para controle dos usuários sobre a automaitização da fachada dupla	<i>Corridor Façade</i>		Fonte: BODART; GRATIA, 2003
Caso 8	Eurotheurn/ 1999	Frankfurt, Alemanha	Novomy Mähner + Associates	22 pav.	0,34m	Abertura no topo com abas que fecham em dias de chuva e tela anti insetos	Esquadrias de alumínio que funcionam como camada interna	Possibilidade de ventilação natural na maioria do ano Últimos sete pavimentos para ocupação hoteleira	<i>Multi Storey Façade</i>		Fonte: POIRAZIS, 2006
Caso 9	Helicon/ 2000	Londres, Inglaterra	Sheppard Robson	11 pav.	2,0m	Camada externa com vidro simples	Greijas horizontais operáveis, tendo 14% de perfurações e refletância de 70%	Transparência da fachada dupla elimina o uso da iluminação artificial Inclinação das persianas determinadas por células fotoelétricas que detectam os níveis de iluminação interior	<i>Extract-air Façade</i>		Fonte: POIRAZIS, 2006
Caso 10	Telus Headquarters/ 2000	Vancouver, British Columbia	Peter Busby e Associates	8 pav.	0,90m	Aberturas no topo e base em cada pavimento	Lightshelves funcionam como brises	Camada externa contribui para aquecimento e resfriamento, conforme necessário Edifício de 1940 com painéis fotovoltaicos integrados à camada externa	<i>Twirl-face Façade</i>		Fonte: www.perkinswill.ca

Caso 11	Edifício ARAG 2000 Tower/2000	Düsseldorf, Alemanha	RKV e Norman Foster	31 pav.	0,70m	Cada uma das janelas tem 15 cm de abertura, sob a forma de rasgo que pode ser fechado	Dispositivo em forma de persiana instalada mais próxima da camada externa	Ar viciado é extraído da cavidade por meio de abertura manual	Uso de vidros de baixa emissividade	Shaft – Box Façade		Fonte: POIRAZIS, 2006
Caso 12	Caisse de dépôt et placement du Québec (CDPQ)/ 2002	Montreal, Canadá	Eric Gauthier e Andre Povin	13 pav.	Cerca de 0,10m	Abertura em rasgo em cada pavimento	Dispositivos automáticos dentro da cavidade	Abertura manual na base de cada pavimento		Hybrid Façade (parte opera como <i>Twin-face</i> Façade e parte como sistema de abertura clássico)		Fonte: www.somfy-architecture.com
Caso 13	Edifício Genzyme Corporation / 2003	Massachusetts, EUA	Behnish e Partner Inc.	12 pav.	1,20m	Dois aberturas em cada pavimento	Dispositivos automáticos dentro da cavidade	Permite abertura parcial da camada externa	Uso da vegetação na cavidade para circulação	Corridor Façade		Fonte: www.360.steelcase.com
Caso 14	Associação Comercial Edifício Cidade Nova/ 2008	Rio de Janeiro, Brasil	Ruy Resende Arquitetura	8 pav.	0,80m	Aberturas no topo e na base da fachada	Não há	Uso de vidros de baixa emissividade		Multi Storey Façade		Fonte: www.arqçoweb.com.br
Caso 15	Manitoba Hydro Place Head Office / 2008	Manitoba, Canadá	KPMB	22 pav.	1,0m	Aberturas próximas ao piso e ao teto em cada pavimento	Dispositivo automático controlado pela radiação solar	Usa 65% menos energia quando comparado com um edifício de escritórios com um projeto convencional	Camada interna manualmente operada e a externa automatizada	Corridor Façade		Fonte: www.iisbe.org
Caso 16	Edifício Print Media Academy/	Heidelberg, Alemanha	Schroder Architekten e Studio Architekten Bechtloff	14 pav.	0,46m	Abertura em cada "janela"	Placas de alumínio mecânicas que se movimentam de acordo com a incidência solar	Possui grelha que ajuda no controle do sistema de ventilação	Todas as fachadas projetadas de maneira igual	Box Window		Fonte: POIRAZIS, 2006

Como pode ser observado no Edifício Telus Headquarters (Quadro 1, caso 10), as aberturas na pele interna permitem que o ar que circula na cavidade central seja capaz de penetrar no ambiente interno da edificação. Em dias frios a camada externa pode permanecer fechada e o ar confinado na cavidade intermediária é ser aquecido com a incidência de radiação solar. Nesse caso, as janelas da camada interna podem ser abertas para promover uma circulação higiênica do ar no ambiente interno. Já em dias mais quentes, as aberturas localizadas na camada externa vão admitir a entrada do ar fresco proveniente do lado externo da edificação. Assim, a camada externa contribui para aquecimento e resfriamento, conforme necessário.

O caso do Edifício Debis Headquarters (Quadro 1, caso 5), com 13 pavimentos a mais que o anterior, possui o mesmo conceito de confinamento e circulação do ar, porém, diferencia-se pela configuração das aberturas ao longo da camada externa. Nesse exemplo, as aberturas são controladas automaticamente por motores que movimentam a estrutura de metal dos painéis de vidro. As rotações dos painéis podem chegar a 70° quando totalmente abertos e agem de acordo com as condições locais de temperatura, ventilação e insolação (BODART; GRATIA, 2003). Assim, é possível verificar que a forma como as aberturas da camada externa ao longo da fachada são projetadas, tem grande importância nas características da ventilação natural no ambiente, pois é o que determina o efetivo direcionamento do ar para dentro da cavidade.

Diferentemente do caso anterior, em que há ventilação mecânica para dias com temperaturas extremas, o Edifício Suva (Quadro 1, caso 2) permite o controle manual de uma parte da camada externa. A importância dessa operação pode ser destacada pela autonomia que o usuário adquire em relação às suas necessidades térmicas e de ventilação.

Um artifício que pode ser incorporado nas cavidades centrais é a vegetação, como ocorre no Edifício Genzyme Corporation (Quadro 1, caso 13). As plantas colocadas na cavidade intermediária funcionam como dispositivos de sombreamento. No verão, as folhas bloqueiam os ganhos solares e evitam que o ar atinja altas temperaturas. O uso de plantas caducifólias permite que no inverno, a temperatura das camadas e do ar cavidade torne-se mais altas devido à radiação solar incidente e, desta forma, o ar aquecido do espaço intermediário poderá esquentar os ambientes internos. Assim, o ar da cavidade mantém em

constante circulação o ar interno, contribuindo para a redução dos gastos com condicionamento do ar.

É importante destacar que, diferentemente dos outros casos, o Edifício GSW Headquarters (Quadro 1, caso 1) não possui a perspectiva de promover a transparência da fachada. Os painéis coloridos, quando fechados, impedem a entrada de iluminação natural nos ambientes internos, o que poderá ocasionar maior consumo energético com iluminação artificial. Já o Edifício Associação Comercial e Empresarial Cidade Nova (Quadro 1, caso 14) priorizou a transparência e dessa forma, ficam bem definidos a base opaca, o corpo envidraçado e transparente da fachada.

A solução encontrada no edifício Telus Headquarters, citado anteriormente, com a colocação de painéis fotovoltaicos na fachada dupla é uma estratégia que visa o aumento do desempenho da envoltória na edificação. No sentido de suprir o fornecimento de energia dos ventiladores que auxiliam na circulação do ar da cavidade central, os painéis fotovoltaicos proporcionam uma fachada que é capaz de auxiliar nas condições de conforto sem o uso de energia elétrica para condicionamento de ar ou ventilação mecânica (BOAKE *et al.*, 2001). Assim, o uso de inovações tecnológicas é incorporado às estratégias passivas de ventilação sem prejuízo para o ambiente.

Alguns dos edifícios estudados, como o GSW Headquarters e o Suva, receberam a camada externa alguns anos após sua construção, durante um processo de reforma. Isso indica a possibilidade do uso da fachada dupla como elemento estratégico em termos de conforto que pode ser incorporado à edificação, melhorando a qualidade do conjunto.

Um aspecto interessante é que os casos estudados possuem diferenças nas larguras de suas cavidades variando entre 0,34 m e 1,20 m. Porém, a maioria possui dimensões em torno de 0,90m, o que pode ser explicado pela necessidade de facilitar a manutenção da cavidade. Alguns exemplos como o Manitoba Hydro Place Head Office (Quadro 1, caso 15) e o Genzyme Corporation (Quadro 1, caso 13) possuem plataformas horizontais nos pavimentos, que ajudam nessa manutenção.

Em relação aos dispositivos de sombreamento utilizados, observa-se que em alguns casos a própria camada externa funciona como brise, como nos edifícios GSW Headquarters e Suva. Nos edifícios Aula Magna e Victoria Life Insurance há cortinas venezianas que limitam a incidência solar. Há casos em

que as plataformas de manutenção atuam como brises horizontais como no edifício Debis Headquarters, por exemplo. Já no edifício Manitoba Hydro Place Head Office há dispositivos automáticos dentro da cavidade que se movimentam de acordo com a incidência solar.

2.3.4 Avaliação de desempenho de fachadas duplas

Esta seção trata dos efeitos que a fachada dupla é capaz de provocar ao ambiente construído, com foco nos benefícios relacionados ao comportamento da ventilação, no desempenho térmico e na redução do consumo de energia nos edifícios com fachadas duplas. São apresentados ainda alguns parâmetros para análise de seu desempenho.

Ventilação pelo efeito da chaminé térmica

Scigliano e Hollo (2001) explicaram que o fenômeno do efeito chaminé ocorre devido ao processo de convecção natural, onde a recirculação do ar é criada pela diferença de densidade entre o ar mais quente e mais frio. O ar aquecido torna-se menos denso e, portanto, mais leve do que o ar mais frio. Assim, o ar mais quente tende a subir e o ar mais frio se desloca para tomar o lugar do ar quente. Os autores observam que essa movimentação do ar gera a ventilação natural e a eficiência desta depende da livre passagem do ar pelo interior dos edifícios através das aberturas de entrada e saída de ar.

A ventilação é utilizada para diferentes fins. Sua finalidade principal é a troca de ar do ambiente interno e o exterior. O sistema de ventilação de um edifício é um dos fatores mais importantes para a criação de um ambiente interior confortável (STREICHER *et al.*, 2005). Assim, um dos responsáveis pelo controle do calor que entra pela fachada, em um ambiente, é a ventilação. Ela é necessária para a troca higiênica do ar e tem estreita relação com as trocas de energia do edifício com o meio (EICKER *et al.*, 2008).

A pesquisa realizada por Wong, Prasad e Behnia (2008) mostrou que o desempenho de uma fachada dupla depende, em grande parte, do tipo de ventilação escolhido para atuar na cavidade intermediária e incluem o modo natural, representado pelo efeito chaminé, mecânica ou mista. Segundo os autores, estudos que avaliaram os resultados positivos do efeito chaminé em edificações situadas em climas quentes, identificaram significativa economia energética e melhoria do conforto térmico interior com a exploração da

ventilação natural, que se dá por meio de aberturas na camada externa, mesmo em edifícios de vários pavimentos.

Ding, Hasemi e Yamada (2005) avaliaram o desempenho da ventilação natural em uma fachada dupla, por meio da construção de um protótipo e simulação computacional. Eles explicaram que o ar do espaço intermediário é aquecido devido à energia vinda da radiação solar. Com as aberturas das camadas da fachada dupla, o fluxo de ar é ativado pelo efeito chaminé. No verão, o ar que está com alta temperatura é extraído pela movimentação do ar, reduzindo o calor da cavidade. No inverno, as aberturas das camadas podem ser fechadas para evitar o escape do calor. Em estações mais amenas, o efeito chaminé que ocorre no espaço intermediário é normalmente usado como força motriz para promover a ventilação natural de todo o edifício.

Portanto, a ventilação natural em ambientes com fachadas duplas, que é provocada pelo fenômeno do efeito chaminé, ativa as trocas convectivas da ambiente pela movimentação do ar na cavidade. O estudo deste fenômeno é importante para verificar o quanto a implantação de uma fachada dupla é capaz de ventilar uma edificação.

Cálculo analítico da vazão de ar

Uma das formas de verificar a coerência de modelos simulados em programas computacionais é confrontando os dados de vazão nas aberturas do modelo com os valores calculados por modelos analíticos. A vazão de ar proporcionada pelo efeito chaminé pode ser descrita pela seguinte equação, segundo a ASHARE Fundamentals (2005):

$$Q = C_D A \sqrt{2g \Delta H_{NPL} (t_i - t_o) / t_i} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

Q = vazão de ar, m³/s;

C_D = coeficiente de descarga da abertura;

A = área de abertura;

g = gravidade;

ΔH_{NPL} = altura do ponto médio da abertura mais baixa até ponto neutro de pressão, m;

t_i = temperatura interna (ou maior temperatura), K;

t_o = temperatura externa (ou menor temperatura), K.

Esta equação não foi desenvolvida especificamente para edificações com fachadas duplas, mas a partir dela foi possível fazer relações com os resultados encontrados nesta pesquisa. Segundo a norma, o coeficiente de descarga considera os efeitos de viscosidade, de arrasto e de mistura. A norma complementa que é difícil estimar a altura da linha neutra de pressão da abertura para ambientes naturalmente ventilados. Se a janela representa uma alta fração (aproximadamente 90%) da área total da superfície da fachada, a linha neutra de pressão pode ser considerada na meia altura da abertura. A área indicada na equação é obtida quando as áreas de entrada e saída do ar são iguais. Segundo a norma, quando há diferenças entre as áreas de entrada e saída de ar, há aumento na vazão. O H representa a altura/distância que o ar da cavidade percorreu até a saída da chaminé térmica. Assim, quanto maior a altura da chaminé térmica, maior será a vazão de ar pelas aberturas. A diferença de temperatura é um dos fatores que influenciam na vazão de ar pelo edifício com fachada dupla. A vazão é proporcional à raiz da diferença das temperaturas do ar mais alta e mais baixada, dividido pela temperatura mais alta. Como os valores são inseridos em Kelvin, o resultado obtido pela variação na raiz do denominador irá variar pouco. Assim, os fatores dessa equação podem ser usados como parâmetros para verificar a influência da configuração de fachada dupla na ventilação de um edifício.

Propriedades térmicas e consumo de energia

As fachadas duplas dependem de um sombreamento localizado no espaço intermediário entre camadas para controlar as cargas devido à radiação solar. As expectativas são semelhantes aos sistemas de sombreamento exterior, em que as cargas de radiação solar são bloqueadas antes de entrar no edifício. No caso dessa tipologia de fachada, o calor absorvido pelo sistema de sombreamento é liberado no espaço intermediário, e em seguida, devolvido para o exterior por ventilação natural ou mecânica. Com isso, demandas de carga de refrigeração são diminuídas (LEE *et al.*, 2002).

Baldinelli (2009) complementa que a interação entre a radiação incidente e a energia fornecida ao ambiente interno, por meio da fachada dupla, se dá por diferentes formas: em ganho direto, em que a contribuição de calor que prevalece é dada pela radiação solar que é transmitida através das superfícies transparentes e por ganho indireto, que ocorre principalmente por convecção.

Assim, para se atingir altos níveis de economia de energia com as fachadas inteligentes, são desejáveis que logo nos primeiros estágios do projeto, sejam analisados modelos que representem a complexidade desse sistema (OCHOA; CAPELUTO, 2009).

Segundo Hilmarsson (2008), a maioria de pesquisadores que tem interesse em fachadas duplas, tenta identificar seu desempenho relacionando-as à eficiência energética. O autor complementa que a fachada dupla pode ser uma solução viável para projetos que procuram eficiência energética, mesmo com grandes áreas envidraçadas.

Hien *et al.* (2005) investigaram os efeitos da fachada dupla de vidro sobre o consumo de energia e o conforto térmico, comparando-os com um sistema de fachada simples. O objetivo foi analisar os impactos da ventilação natural na economia de energia para edifícios condicionados. Os autores avaliaram três configurações num mesmo edifício: com fachada simples; com fachada dupla e ventilação natural, gerada pelo efeito chaminé; com fachada dupla e ventilação mecânica colocada no topo da cavidade. A simulação computacional foi utilizada para os cálculos do consumo de energia. A pesquisa foi realizada em Singapura, que possui um clima tropical úmido e quente.

Segundo os autores, as cargas de refrigeração aumentam dos pisos mais baixos para os mais elevados, o que é explicado, principalmente, devido ao aumento dos ganhos de calor solar com a altura da fachada. Foi identificado também maior aumento de cargas térmicas nas orientações leste e oeste, o que contribui para o aumento do consumo de energia com equipamentos para resfriamento do ar. Os autores concluíram que as cargas relativas aos condicionadores de ar foram drasticamente reduzidas com a ajuda da fachada dupla (aproximadamente 120MWh/ano), o que pode ser atribuído a dois fatores: redução dos ganhos de calor vindos da radiação e extração do calor na cavidade pela ventilação. Contudo, não há muita diferença no consumo energético entre as fachadas duplas com ventilação por efeito chaminé e mecânico. Assim, concluíram que a fachada dupla com ventilação puramente natural pode ser suficientemente efetiva na extração do ar quente da cavidade e na diminuição do consumo de energia relativo ao condicionamento do ar.

Para Zhou e Chen (2010) o consumo energético em edificações com fachadas duplas depende de seu desempenho térmico, especialmente da transferência de calor e ganhos solares, o que difere de acordo com as estações

do ano e a latitude local. Assim, uma das potenciais contribuições das fachadas duplas está relacionada à diminuição do consumo energético dos ambientes internos, mantendo a qualidade climática interior.

Streicher *et al.* (2005) destacam um importante aspecto que deve ser observado para a economia no consumo de energia: a orientação solar da face com fachada dupla. Segundo os autores não há razões para ter fachadas idênticas voltadas para diferentes direções e assim, o projeto deve basear-se na orientação para a qual a fachada está voltada. A fachada sul (correspondente à norte no hemisfério sul) é adequada para o aproveitamento do calor solar. A fachada voltada para o norte (sul, no hemisfério sul corresponde à norte) pode ter uma expressão mais tradicional, com janelas menores e alto nível de isolamento. As faces leste e oeste podem enfrentar problemas de superaquecimento no verão, devido ao menor ângulo incidente dos raios solares. Os autores concluem que as diferentes faces do edifício devem ser tratadas com muito cuidado.

Portanto, o projeto da fachada dupla deve atentar-se para os fenômenos que ocorrem nas camadas da fachada preocupando-se com a quantidade de incidência de radiação e o tipo e quantidade de ventilação apropriada ao espaço. Além disso, o projeto deve atentar-se para o comportamento térmico e o consumo de energia do ambiente.

2.4 Parâmetros para análise de desempenho da ventilação em ambientes com fachada dupla

Para a análise do desempenho da ventilação a partir dos resultados das simulações detalhadas na seção 3.2 (Programa computacionais e os procedimentos para as simulações), foram adotados alguns parâmetros para a avaliação do potencial de ventilação no modelo com fachada dupla.

2.4.1 Velocidade do ar X Temperatura do ar

Roedler (1957, citado por Macintyre, 2008) apresenta um gráfico (Figura 6) que mostra a zona de conforto térmico considerando a temperatura do ar local e sua velocidade.

Este gráfico não considera, porém, a umidade relativa do ar no recinto. O autor ressalta que em casos de elevada taxa de umidade, mesmo que o ambiente possua elevada ventilação, pode não ser possível conseguir a

evaporação nas condições necessárias. Neste caso, o conforto ambiente só será possível com remoção desta umidade, usando condicionador de ar.

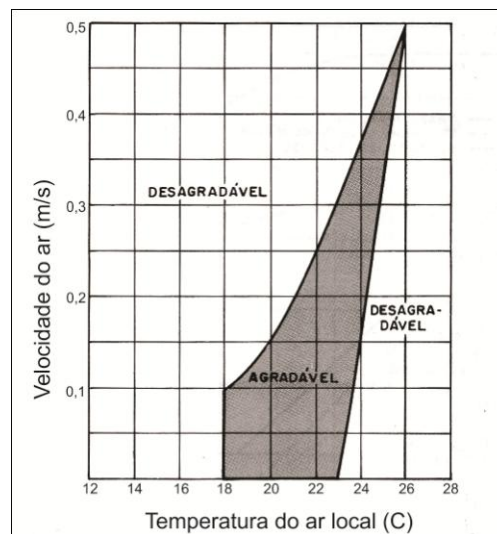


Figura 6 – Gráfico Zona de bem estar para valores da temperatura do ar local e velocidade do ar. Fonte: Roedler (1957, citado por Macintyre, 2008).

Givoni (1992) também estabelece uma zona de conforto delimitada na carta psicrométrica, apresentada na Figura 7. Segundo o autor, cartas bioclimáticas facilitam a análise das características climáticas de determinado local do ponto de vista do conforto humano, uma vez que apresentam sobre um gráfico, a combinação simultânea de temperatura e umidade. Essas cartas são estruturados em torno da “zona de conforto”, com intervalo de condições em que a maioria das pessoas não sentiriam desconforto térmico, por frio ou calor.

A carta indica que se a temperatura ultrapassar 29°C e até 34°C ou a umidade relativa for superior a 80%, a ventilação pode ser usada como uma estratégia para melhorar a sensação térmica.

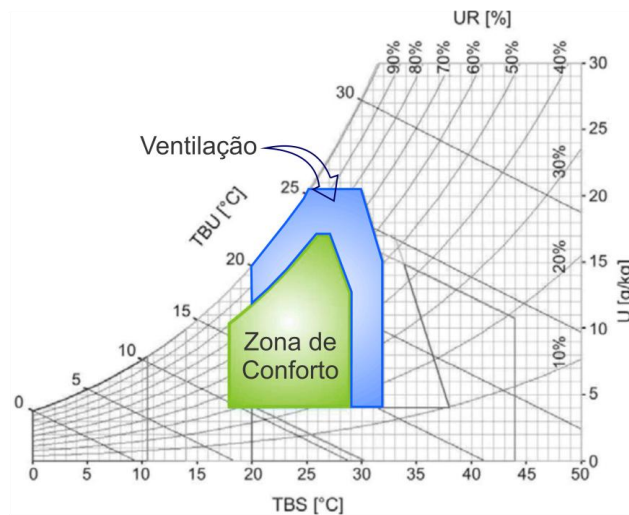


Figura 7 – Diagrama psicrométrico para países de clima quente. Fonte: adaptado de Givoni (1992).

2.4.2 Taxa de renovação de ar

Macintyre (2008) apresenta uma tabela com valores de renovações de ar por hora. Em edificações que comportam atividades como de escritórios, o valor recomendado pela tabela é de 6 a 20 renovações por hora. Para salas de auditórios, esse valor varia de 10 a 20 renovações por hora, sendo que os valores mais altos aplicam-se a casos de climas quentes e onde haja fumaça de cigarros.

A Portaria nº 3523, de 28 de Agosto de 1998 do Ministério da Saúde determina a taxa de renovação mínima em um ambiente por número de pessoas: 27 m³h/pessoa (BRASIL, 1998). Isso significa que para uma sala que comporta 40 pessoas, a taxa de renovação deve ser de 1080m³/h.

2.5 Caracterização do clima tropical de altitude

Nesta seção é feita uma análise do contexto climático usado para a avaliação do modelo simulado. Será abordado o macroclima tropical e o clima tropical de altitude, contexto específico deste trabalho. Será abordado também o comportamento climático da cidade de Viçosa, MG, cujos dados meteorológicos serviram como base para indicar o desempenho da ventilação da fachada dupla.

Embora feita a mais de 100 anos, a classificação do clima originalmente formulada por Wladimir Koppen e modificada por seus colaboradores e sucessores, ainda está em uso (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007). Os autores apresentaram um mapa atualizado da classificação de Koppen-Geiger

baseados em dados de estações de todo o mundo. Foram determinados 30 tipos de climas no globo, conforme Figura 8.

Segundo os autores, o mapa indica que para a América do Sul, os três principais tipos de clima em área continental são: tropical (60,1%), seguindo pelo temperado (24,1%) e árido (15,0%).

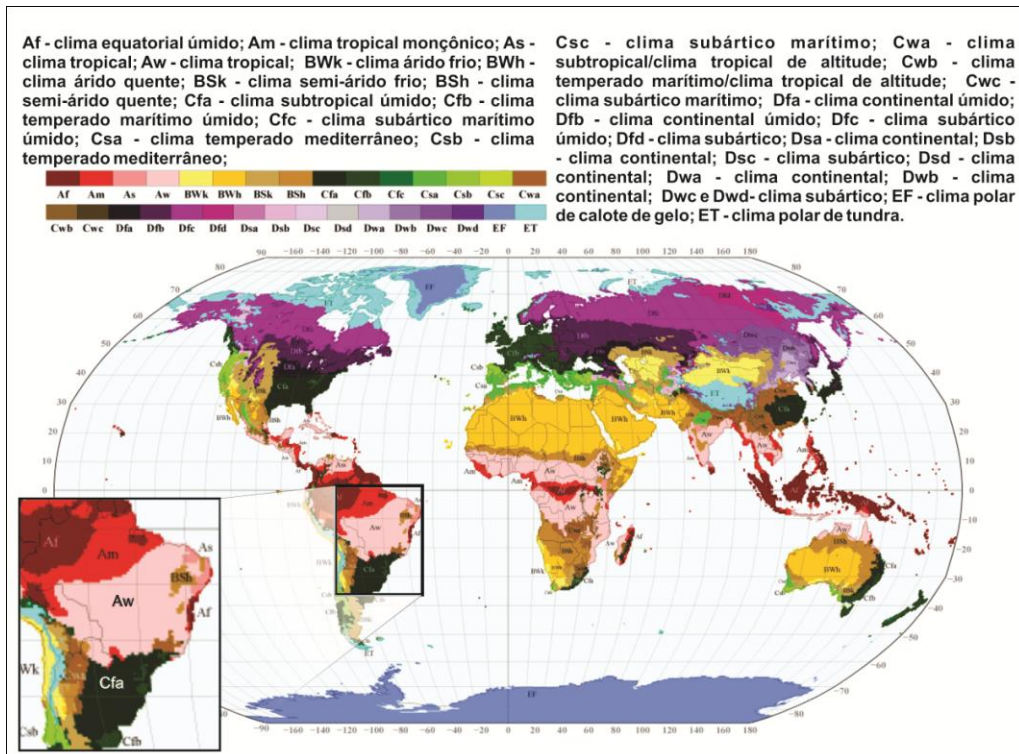


Figura 8 - Mapa mundial de classificação climática de Köppen-Geiger. Fonte: PEEL et al. (2007).

2.5.1 Clima tropical e clima tropical de altitude

O território brasileiro estende-se de 5°16' de latitude norte a 33°45' de latitude sul, sendo atravessado pela linha do equador e pelo trópico de Capricórnio, o que indica presença de fortes marcas da tropicalidade (ROSS, 2005). O clima do Brasil é, de maneira geral, o clima tropical, por sua posição geográfica que lhe confere aspectos particulares como considerável luminosidade do céu (insolação) e elevadas temperaturas aliadas à pluviosidade (OLIVEIRA; MENDONÇA, 2007).

Ross (2005) afirma que as características da tropicalidade se manifestam em quase todo o espaço brasileiro, mas há diferenças de uma área para outra. O autor aponta algumas características do ambiente tropical, como temperaturas médias superiores a 18°C e diferenças sazonais marcadas pelo regime de chuvas.

Na classificação climática brasileira apresentada por Ross (2005), a região Sudeste está situada no domínio do clima tropical, abrangendo também parte da região Centro-oeste e o Nordeste. Nessa área, as temperaturas médias anuais estão acima de 18°C e há uma nítida alternância entre as estações seca e chuvosa (ROSS, 2005). Segundo o mesmo autor, dentro do domínio tropical, uma área que aparece com individualidade marcante são os planaltos e serras do Sudeste. Essa área é chamada clima tropical de altitude (Figura 9), no qual as temperaturas médias anuais caem para menos de 18°C e a pluviosidade se acentua.

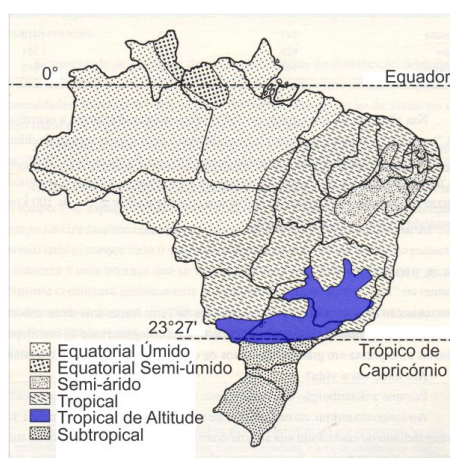


Figura 9 - Mapa Tipos de clima no Brasil. Fonte: adaptado de ROSS, 2005.

As principais características do clima tropical de altitude são marcadas pela heterogeneidade dos diferentes tipos de tempo durante o ano, sendo os quentes e úmidos concentrados no verão e com o inverno seco e com quedas pontuais de temperatura.

2.5.2 Clima da cidade de Viçosa MG

Segundo os arranjos propostos por Ross (2005) e Koppen-Geiger (PEEL; FINLAYSON; MCMAHON, 2007), a cidade de Viçosa MG (20° 45' 14" S 42° 52' 55" O) (Figura 10) encontra-se no clima tropical de altitude. No Brasil, esse domínio tropical de marcante individualidade abrange parte de Minas Gerais, do Espírito Santo e dos estados do Rio de Janeiro e São Paulo, onde altitudes acima de 1000 metros determinam condições especiais de clima (ROSS, 2005).

Rodrigues *et al.* (2010) pesquisaram sobre o comportamento climático da cidade de Viçosa MG e definiram que o local apresenta períodos bem definidos com invernos secos e frios e verões quentes e úmidos. Segundo os autores, as temperaturas máximas médias registradas na estação entre 1968 e 2008,

atingem seus valores mais elevados nos meses de fevereiro e março sendo 29,3 °C e 28,6 °C, respectivamente. As temperaturas mínimas médias registradas na estação para o mesmo período atingem seus menores valores nos meses de junho e julho sendo respectivamente, 11,1 °C e 10,6 °C, de acordo com os dados registrados na estação do INMET (instalada no campus da Universidade Federal de Viçosa) entre 1968 – 2008.



Figura 10 - Mapa de Minas Gerais, com a localização de Viçosa.

Guimarães e Carlo (2011) também analisaram os dados climáticos de Viçosa e revelaram que essa cidade apresenta situação de desconforto em 61,6% do ano, sendo 48,2% por frio e 13,4% por calor. Assim, sugerem explorar as estratégias de aquecimento solar por inércia térmica (35,6% do ano) e o aquecimento solar passivo (9,12% do ano) para o inverno, além da ventilação natural (13,3% do ano) para o verão. Com relação à umidade, constatou-se que Viçosa é uma cidade de elevada umidade relativa e que as máximas se mantêm bem acima dos limites de conforto durante todo o ano. Os autores revelaram também que, em geral, a radiação é bem distribuída entre os períodos da manhã e da tarde. A respeito da direção de ventos, a mais relevante é a nordeste, e de forma menos expressiva, a direção leste.

Os autores identificaram as frequências horárias em que há necessidade de estratégias de ventilação para ambientes em Viçosa. Segundo os autores, as estratégias de ventilação são mais necessárias no período diurno, embora tenha ocorrência também no período noturno, como mostrado na Figura 11.

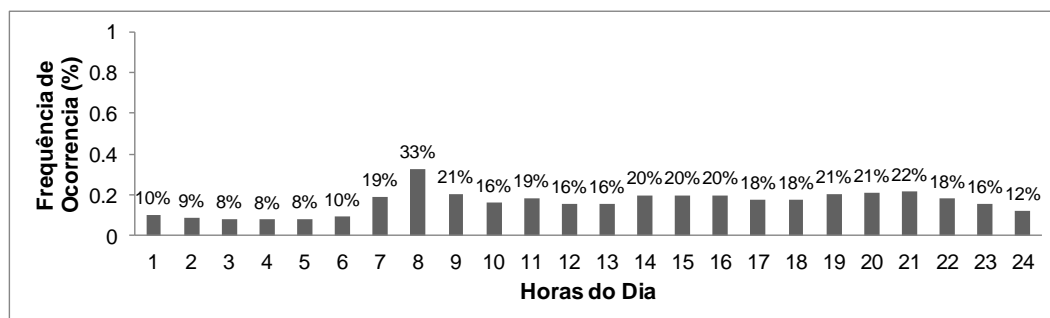


Figura 11 – Frequência de ocorrência das horas que em estratégias de ventilação são necessárias, em relação ao ano todo. Fonte: GUIMARÃES; CARLO, 2011.

Os autores destacam que o horário de 8h da manhã foi o de maior frequência de ocorrência para a necessidade de ventilação (33%), que é o horário de transição das temperaturas e umidades relativas. A análise do desempenho das fachadas duplas em clima tropical será feita por meio dos dados climáticos específicos da cidade de Viçosa, MG.

A próxima seção discute os benefícios do uso da simulação computacional e os programas mais indicados para as análises de fachadas duplas.

2.6 Simulação computacional

A simulação computacional é um recurso que pode contribuir para melhorar o desempenho de edificações. As análises computacionais estão cada vez mais avançadas com os métodos de cálculo cada vez mais precisos e os resultados cada vez mais concisos (HILMARSSON, 2008). Hensen e Lamberts (2011) complementam que o desempenho da simulação computacional tem potencial para transmitir, direta ou indiretamente, benefícios às partes interessadas, às edificações e ao meio ambiente. Além disso, os testes realizados por meio de simulação computacional permitem configurar o modelo assumindo condições de contorno dinâmicas e normalmente baseadas em métodos numéricos que objetivam fornecer uma solução aproximada de um modelo realista, levando em conta a complexidade do mundo real.

Segundo os mesmos autores, prever e analisar o comportamento futuro de um edifício é mais eficiente e econômico que resolver problemas quando o edifício já está em uso. Assim, a simulação ganhou espaço no setor da construção por meio do reconhecimento de seu papel na previsão, avaliação e verificação do desempenho do edifício (HENSEN, 2008).

Atualmente, existem mais de 390 programas de simulação listados no *Building Energy Tools Directory*¹, mantida pelo Departamento de Energia dos EUA que reúne informações sobre as principais ferramentas de simulação disponíveis. Alguns deles são: o TRNSYS, que realiza simulações de energia, de desempenho energético do edifício e faz cálculo de carga térmica; o *ECOTECH*, que faz análises térmicas e das cargas de aquecimento e refrigeração, avaliações da iluminação natural e artificial, do ciclo de vida e da acústica; e o *DESIGNBUILDER*, que é uma interface para o EnergyPlus capaz de simular as emissões de CO₂ e de condicionamento de ar, faz ainda análises de ventilação e iluminação natural e estudos de conforto.

Trindade *et al.* (2010) complementam que o uso da simulação computacional como ferramenta de auxílio ao projeto, vem se consolidando como uma alternativa viável para determinação de desempenho térmico e energético, bem como os de predição da ventilação. O uso de programas para simulação facilita a análise de dados e a partir dos resultados permite obter orientações para decisões de projeto (RAMOS; GHISI, 2010).

Um problema freqüentemente encontrado por simuladores é que algumas alternativas de projeto ou componentes específicos são possíveis de serem executados com o uso de alguns programas enquanto outros aspectos são possíveis em outros. Assim, algumas estratégias para possibilitar o desenvolvimento de integração dos programas podem incluir a conexão de dados e processos de modelagem em um único sistema e/ou por meio de co-simulação de modelos acoplados (HENSEN, 2008).

2.6.1 Simulação computacional de Fachadas duplas

Segundo Manz e Frank (2005), alguns projetos envolvem temas complexos do ponto de vista físico, necessitando de uma investigação cuidadosa logo nos primeiros estágios de concepção, como é o caso de edifícios com fachadas duplas. A diversidade de formas de construção que podem alterar o comportamento térmico da fachada dupla e o grande número de parâmetros envolvidos leva à necessidade de criação de modelos e simulações. No entanto, não há uma ferramenta de programa única, que pode acomodar todos os níveis de modelagem dessa tipologia de fachada (MANZ, FRANK; 2005).

¹ www.eere.energy.gov/buildings/tools_directory.

Os mesmos autores defendem a necessidade da divisão de modelagem e simulação das fachadas duplas em três níveis para uma simulação de confiança do comportamento térmico dos edifícios com fachadas duplas:

- Nível 1: Ótica da Sequência de Camadas - os autores atentam para as reflexões, absorções e transmissões que ocorrem em cada face das diferentes camadas da fachada dupla. Esses fenômenos das interfaces devem ser levados em conta, pois se alteram com a mudança de temperatura ou com as cores dos materiais das camadas, por exemplo.

- Nível 2: Termodinâmica e Dinâmica de Fluidos - trata dos fluxos de ar na cavidade intermediária. A geometria das camadas, as resistências dos elementos (brises, ventiladores) aos fluxos de ar determinam as correntes de ar e a distribuição da temperatura pelas camadas. A ferramenta de simulação usada neste caso deve ser capaz de prever padrões complexos de fluxos de ar e transferência de calor convectivo nas superfícies.

- Nível 3: Construção do Sistema de Energia - descreve o comportamento térmico do conjunto e a condução do calor pelos materiais. Esse nível também é modelado para análise da transferência de calor por convecção, fluxo de ar entre as zonas e ganhos solares pelos vidros.

Os autores atentam que há uma boa compensação do trabalho devido ao baixo custo e à confiabilidade obtida ao analisar o comportamento térmico de todo o edifício com a fachada dupla, usando a abordagem de três níveis. Porém, o principal desafio é a interação entre os modelos.

Com relação à integração desses níveis, Pappas e Zhai (2008) apresentaram um processo de modelagem para análise do desempenho térmico de uma fachada dupla, utilizando dois programas de simulação: o EnergyPlus, e o Phoenics (CFD). A fachada dupla apresenta problemas em programas de simulação energética relacionados às dependências de análises precisas de ventilação, fluxo de ar através da cavidade, transferência de calor radiante, condutiva e convectiva através das áreas envidraçadas e na cavidade. Essas questões dependem da análise das simulações em CFD. Porém, a maioria dos programas de CFD não tem a capacidade de analisar com precisão a incidência angular da radiação através das camadas, nem simular cargas de aquecimento e resfriamento do edifício ou ainda prever o consumo energético do conjunto. Essa análise fica a cargo dos programas de simulação energética. Assim, a união do CFD com EnergyPlus no processo de simulação é capaz de prever com

precisão os fluxos de ar através da cavidade, as temperaturas das superfícies e do ar da cavidade, além da transferência de calor entre as camadas.

Kim e Park (2011) investigaram as causas de discrepâncias entre os resultados de simulações usando o EnergyPlus e dados experimentais de fachadas duplas. Os autores atribuem os seguintes problemas a essas discrepâncias: incerteza das medições e dos parâmetros de entrada, simplificações da realidade durante o processo de modelagem e limitações do programa.

Srebric (2011) argumenta que o estado da arte sobre simulação de ventilação em ambientes construídos inclui modelos de rede de ventilação multizonas e dinâmica computacional dos fluidos (CFD). Segundo Versage (2009), esses métodos apresentam limitações próprias. Com os modelos de rede de ventilação multizonas não é possível descrever a distribuição dos fluxos de ar no ambiente, no entanto é possível fazer simulações dinâmicas, calculando os fluxos de calor convectivos para todas as horas do ano. Os programas CFD, apesar de descreverem os fluxos de ar dentro ou fora das edificações, trabalham em condições estáticas, mas seus modelos fornecem parâmetros detalhados para projetos como velocidades, temperaturas dos fluidos de forma rápida e confiável. Assim, sua abordagem é mais detalhada comparada com os programas que usam modelos de rede de ventilação (SREBRIC, 2011).

Neto *et al.* (2011) apresentaram etapas para os processos de simulação dos efeitos dos ventos das edificações. Os autores afirmam que o primeiro passo necessário à modelagem, refere-se ao desenho da geometria, que é a região fluidica do espaço de interesse. A próxima etapa é a geração de uma malha, que divide o espaço em um conjunto de volumes. “É importante verificar se a malha resultante deste processo possui volumes elementares homogêneos, pois o resultado final da simulação é altamente dependente da qualidade da malha” (Neto *et al.*, 2011, p.6).

Outro ponto levantado pelos autores diz respeito às dimensões do domínio externo, que deve ser grande o suficiente para que o escoamento em torno do domínio interno seja plenamente desenvolvido. Além disso, os autores destacam a determinação das condições de contorno, que mostram parâmetros do modelo.

“O entendimento do fenômeno físico que envolve a simulação é de vital importância para que os parâmetros utilizados no modelo CFD reflitam o

fenômeno que se quer modelar” (Neto *et al.*, 2011, p. 9). Daí a importância dos conhecimentos sobre os efeitos da ventilação que ocorrem na cavidade da fachada dupla. Entre os programas de CFD comerciais disponíveis estão o FLUENT, o FLOVENT, o PHOENICS e o ANSYS CFX.

No trabalho desenvolvido por Jiru, Tao e Haghghat (2011) foram simulados no CFD modelos correspondentes ao um protótipo construído no *Dipartimento di Energetica, Politecnico di Torino*, na Itália. Os autores afirmam que embora haja discrepâncias nas previsões quantitativas do modelo, quando comparado ao experimento, os resultados encontrados na simulação seguiram a tendência dos resultados experimentais. Porém, os autores apresentam apenas o comportamento das temperaturas superficiais e as condições da cavidade e não avançaram na análise das condições do ambiente interno com fachada dupla.

2.7 Contribuições da revisão de literatura para a pesquisa

A revisão de literatura procurou discutir conceitos e apresentar trabalhos já realizados com fachadas duplas. A inteligência nas edificações envolve um vasto campo, abrangendo aspectos do conforto ambiental, da economia de recursos, da comunicação entre sistemas, do controle de custos, da acessibilidade etc. Esta pesquisa restringe sua abrangência às condições de desempenho de ventilação proporcionadas pela fachada dupla ao um ambiente no clima tropical de altitude.

O entendimento dos fenômenos físicos apresentados na seção 2.3.4 - Avaliação de desempenho de fachadas duplas - foi importante para a verificação da coerência dos resultados obtidos nas simulações.

Os casos estudados no Quadro 1 da seção 2.4 contribuíram para a apresentação de diferentes configurações de fachada dupla e dessa forma, forneceu subsídios para a determinação de modelo a ser simulado. A maior parte das pesquisas realizadas em ambientes com fachadas duplas encontradas na literatura está relacionada a condições climáticas mais frias. Porém, é possível perceber o surgimento de trabalhos sobre fachadas duplas em climas quentes e secos, como o trabalho desenvolvido por Yagoub e Stevens (2010) que realizaram testes para um edifício em Abu Dhabi. Porém, o escopo deste trabalho limita-se a um clima quente e úmido, o clima tropical de altitude.

Alguns dos autores não avançaram as exposições para os ambientes internos, ocupáveis, mas se conservaram nos resultados da cavidade. Os

trabalhos desenvolvidos por Gratia e Herde (2004), Ding, Hasemi e Yamada (2005), Torres *et al.* (2007), e Jiru, Tao e Haghighat. (2011), principalmente, foram relevantes para a escolha e modelagem da tipologia testada e na forma de análise dos dados obtidos.

A forma de integração das ferramentas computacionais para simulação de fachadas duplas foi baseada no trabalho de Pappas e Zhai (2006), que desenvolveram um método para inserção das condições de contorno nos programas. Além disso, as etapas de modelagem de ambientes sujeitos à ventilação natural foi fundamentada no trabalho de Neto *et al.* (2011)

A radiação incidente, as reflexões, absorções e transmissões que ocorrem em cada face das diferentes camadas da fachada dupla, as trocas térmicas entre os materiais das camadas e o escoamento de ar ativado pelo efeito da chaminé térmica da cavidade são fatores que justificam a necessidade da divisão da modelagem e simulação de ambientes com fachadas duplas. Vê-se, portanto, a necessidade de simular fenômenos e condições específicas relacionadas às fachadas duplas de acordo com recursos disponíveis em cada tipo de programa.

3 METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para o desenvolvimento da pesquisa. Os procedimentos utilizados podem ser divididos em cinco etapas principais: 1. proposição da geometria do modelo para simulação; 2. investigação e definição dos programas computacionais utilizados e dos procedimentos das simulações; 3. testes de validação para o programa CFD; 4. uso da análise de sensibilidade de variáveis para verificação de desempenho da ventilação de um ambiente com fachada dupla e 5. definição de casos representativos das condições climáticas do clima tropical de altitude por meio das ferramentas de análise térmica e CFD.

Os resultados de temperatura e velocidade do ar obtidos das simulações foram confrontados com os diagramas propostos por Givoni (1992) e Roedler (1957, citado por Macintyre, 2008). As análises das taxas de renovação de ar foram feitas de acordo com a tabela proposta por Macintyre (2008) e pela taxa mínima determinada pela Portaria 3523 do Ministério da Saúde (BRASIL, 1998).

3.1 Descrição geométrica do modelo base para simulação

Foi determinado um modelo experimental simplificado para a realização das simulações. Para a definição desse modelo foram usadas as análises do Quadro 1 apresentado na seção 2.3.3 (Estudos de Caso de edifícios com fachadas duplas).

O modelo usado nas simulações possui 4 pavimentos, o mesmo número encontrado no edifício mais baixo entre os avaliados no quadro de estudos de caso. O tempo de execução das primeiras simulações era de aproximadamente 2 dias. O ambiente (pavimento) possui 54m² cada (6 m de largura e 9m de comprimento) e 3 m de pé direito, sendo os três últimos pavimentos com fachada dupla, situada na face norte do edifício, pois é a face mais adequada para o aproveitamento da radiação solar na latitude de Viçosa no hemisfério sul. As dimensões deste ambiente são próximas a uma das salas de aula teóricas do Departamento de Arquitetura e Urbanismo da Universidade Federal de Viçosa, que comportam uma turma de 40 alunos. A Figura 12 apresenta a vista, o corte esquemático e a planta baixa do modelo base com fachada dupla.

O material utilizado na camada externa da fachada é vidro incolor de 4 mm que permite a transparência e o contato visual com o entorno. O vidro está afastado em 40 cm da camada interna, de alvenaria. Essa largura foi definida em

função dos resultados obtidos no trabalho de Torres *et al.* (2007) (item 'dimensionamento da cavidade' na seção 2.3.2 Componentes de Fachadas Duplas) em que a média de troca de volume de ar foi maior com a largura da cavidade de 40cm.

Para a escolha do tipo de divisão da cavidade foi definido o caso em que o efeito chaminé promove a ventilação ao longo da altura da fachada, o shaft vertical, que permite a entrada do ar pela base da cavidade e a saída no topo da fachada, no último pavimento.

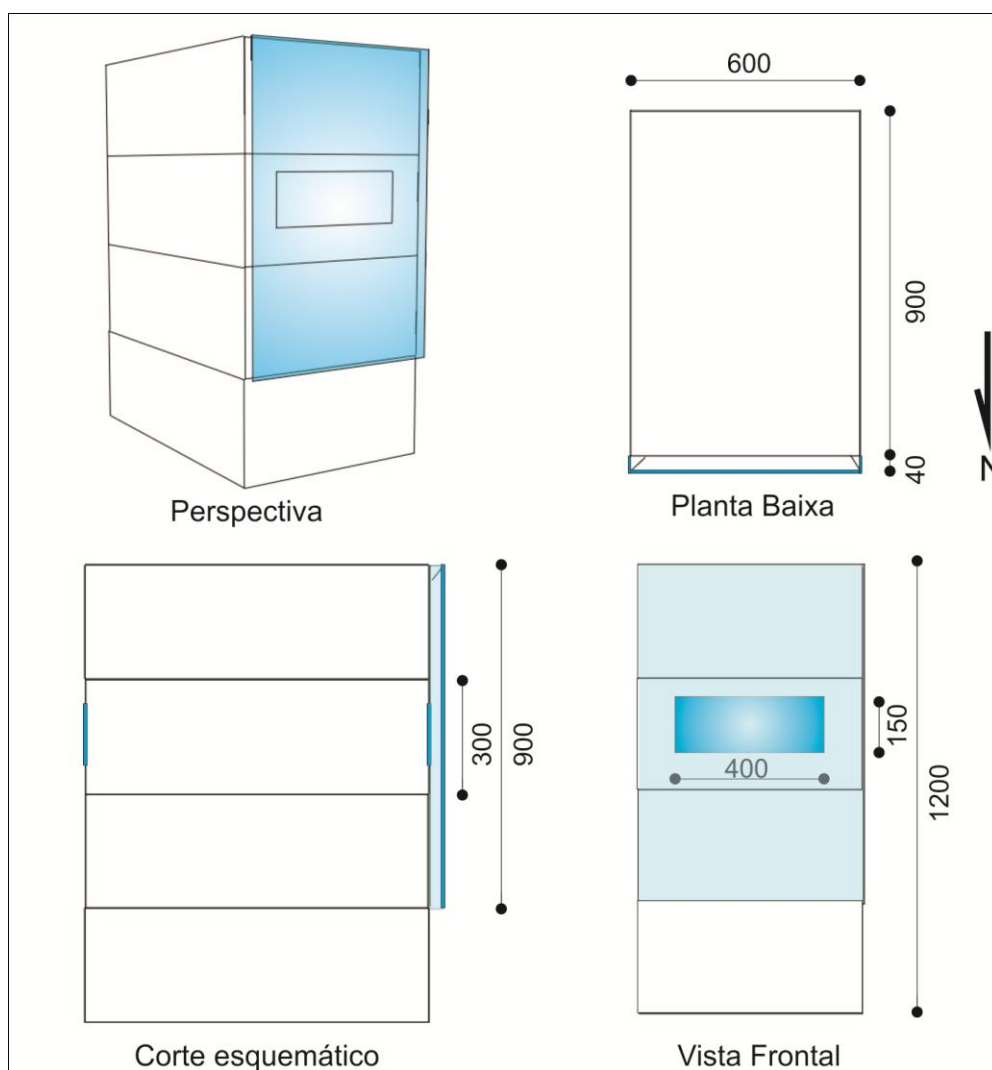


Figura 12 – Fachada dupla: geometria do modelo para simulação.

O ambiente possui duas aberturas de 6m² centralizadas nas faces norte e sul do edifício, com 1m de peitoril. O modelo simulado apresenta aberturas livres em suas janelas, ou seja, elas encontram-se completamente abertas. As análises das simulações foram feitas para o terceiro pavimento, que é o único

que possui as aberturas mostradas na Figura 12, que apresenta os detalhes da geometria do modelo.

3.2 Programas computacionais e os procedimentos para as simulações

Para as simulações foram usados os programas EnergyPlus versão 6.0 e o Ansys CFX versão 11.0. A integração entre os dois programas foi necessária pela complexidade dos fenômenos físicos que ocorrem entre as camadas da fachada dupla e o ambiente interno.

O programa EnergyPlus possui um modo de modelagem que permite configurar a cavidade como uma chaminé térmica, simulando o efeito de ventilação que ocorre neste local devido ao aumento da temperatura do ar. Além disso, seu modelo de rede de ventilação permite troca de massa entre zonas e entre uma zona e o meio externo. Porém, o programa é incapaz de simular o efeito chaminé da cavidade simultaneamente às trocas de ar entre zonas e o meio externo. Não há interação entre o fluxo de ar que percorre a cavidade e o ambiente interno. Segundo o tutorial do programa, na modelagem da chaminé térmica, só é contabilizada a contribuição térmica da chaminé, mas não o fluxo de ar em si. Assim, o modelo de rede de ventilação do programa não é capaz de simular, simultaneamente, a distribuição do escoamento de ar da cavidade (efeito chaminé) e em um mesmo intervalo de tempo (*time step*), a circulação de ar entre a cavidade e o ambiente interno.

Para compensar esta limitação, foi necessário integrar o modelo do EnergyPlus ao modelo de ventilação do CFD. Neste caso, o CFD usa como condições de contorno as temperaturas superficiais das paredes, a temperatura do ar e o fluxo de calor incidente na camada externa da fachada retirado do EnergyPlus (PAPPAS; ZHAI, 2008).

O EnergyPlus é um programa de simulação em regime dinâmico, em que as alterações provocadas no modelo são contabilizadas nos cálculos subsequentes, ao longo do tempo. Ele é capaz de realizar esses cálculos para o ano completo. O CFD também contabiliza as alterações ao longo do tempo, porém devido ao custo computacional, suas simulações são limitadas a curtos intervalos de tempo. Assim, os métodos usados nesta pesquisa foram determinados em função dessas limitações no uso dos dois programas.

3.2.1 Modelagem e simulação no programa ENERGYPLUS

O EnergyPlus é um programa de análise de energia e simulação de carga térmica de edificações. Ele apresenta recursos para simular o consumo de energia e as trocas térmicas resultantes dos efeitos radiantes e convectivos nos ambientes internos durante cada intervalo de tempo da simulação (CRAWLEY *et al.*, 2004). O programa utiliza informações climáticas horárias do lugar, da descrição arquitetônica e construtiva do edifício, dos padrões de uso e ocupação, da potência instalada em sistemas de iluminação, da carga dos equipamentos, das características do sistema de condicionamento de ar, dentre outros.

O EnergyPlus utiliza como dados de entrada, um arquivo climático que reúne dados representativos de uma série de anos e possibilitam análises termo-energéticas para aplicação em projetos. Usualmente, trata-se de registros dos dados climáticos obtidos de estações meteorológicas. O arquivo climático utilizado é o *TMY*² (2005-2010) da cidade de Viçosa MG, que possui o clima tropical de altitude.

Para a simulação do modelo com fachada dupla no EnergyPlus, os planos de cobertura e piso das zonas que representam o primeiro e o último pavimentos foram modelados como adiabáticos³. Esse procedimento serviu para isolar os efeitos das trocas térmicas apenas da fachada com o ambiente interno analisado. A Figura 13 apresenta o modelo para simulação do programa EnergyPlus.

A zona da cavidade foi modelada com a opção de ventilação por efeito da chaminé térmica, com o padrão abertura 24h por dia, durante todos os dias do ano. O modelo não possui condicionamento de ar ou sistemas mecânicos. O Quadro 2 apresenta os detalhes gerais da modelagem no EnergyPlus.

² Arquivo climático *TMY-Typical Meteorological Year* (Ano Meteorológico Típico) - apresenta dados horários de temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido, umidade, pressão barométrica, direção e velocidade do vento, nebulosidade, radiação solar, dentre outros.

³ Apesar do piso do ambiente interno ser adiabático, a zona do pavimento inferior foi criada para viabilizar a execução, pois o programa não permite que nenhum pano de vidro fique em contato com o piso. Nesse modelo, os vidros da base e do topo da cavidade são mantidos abertos o ano inteiro.

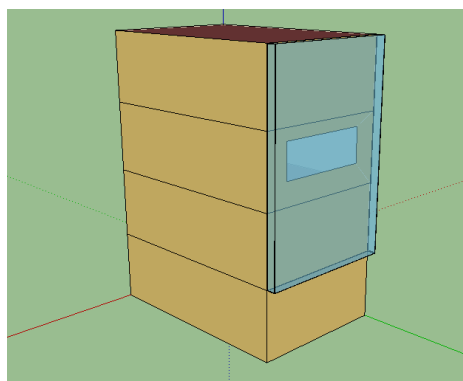


Figura 13 – Modelo para simulação no programa EnergyPlus.

As propriedades térmicas dos elementos construtivos do modelo foram obtidos do trabalho de Ordenes *et al.* (2003), em que os autores caracterizaram materiais e componentes construtivos nacionais. Segundo os autores, para o desenvolvimento de um componente equivalente a ser inserido na biblioteca do VisualDOE (predecessor do EnergyPlus), foi adotado um método de cálculo em que se variam as espessuras e densidades de massa aparente dos materiais, mantendo constantes a resistência térmica (R_t) e a capacidade térmica (C_t) entre as superfícies do componente. Todas as paredes foram modeladas com uma camada interna e outra externa de argamassa de emboço e tijolo cerâmico de 6 furos no centro; as lajes de cobertura e piso são do tipo mista de 12 cm. A Tabela 1 apresenta os materiais usados e suas características.

Quadro 2 - Detalhes da modelagem no EnergyPlus.

Arquivo climático	Arquivo climático de Viçosa (TMY de Viçosa, 2005-2010) modificado (sem vento).
Dimensões do modelo	Largura: 6m; Altura: 3m; Profundidade: 9m
Dimensões da cavidade	Largura: 40cm; Altura: 3 pavimentos (exceto o primeiro)
Orientação da Fachada Dupla	Norte
Zonas	5: 4 pavimentos + cavidade
Vidros	Incolor de 4 mm – transmitância:72%;
Faces adiabáticas	Piso (1° pav.) e cobertura (4° pav.)

Tabela 1 - Características dos materiais inseridos no modelo para simulação.

Nome do material	Espessura real	Espessura Equivalente	Condutividade de térmica (W/mK)	Densidade (kg/m ³)	Calor específico (kJ/kg K)	Resistência térmica (m ² K/W)
Argamassa de emboço	2,5 cm	2,5 cm	1,15	2000	1,0	0,022
Tijolo cerâmico - 6 furos	10 cm	3 cm	0,90	1232	0,92	0,033
Laje mista	12 cm	9,5 cm	1,05	1087	0,92	0,09

O programa gerou os dados de saída⁴ que serviram de condições de contorno para a simulação no programa Ansys CFX (CFD):

- temperatura superficial da camada externa da fachada dupla;
- temperaturas superficiais das demais faces da cavidade;
- temperaturas superficiais das faces do ambiente interno;
- temperatura inicial do ar do ambiente interno;
- temperatura inicial do exterior.

3.2.2 Modelagem e simulação no programa ANSYS CFX - CFD

Os programas que trabalham com CFD (*Computational Fluid Dynamics* – Dinâmica de Fluidos Computacional) são estruturados em três módulos: o pré-processador (onde o usuário pode definir as características geométricas do domínio, a malha com suas sub-regiões, as propriedades do fluido, as condições de contorno, etc.), o módulo processador (responsável pelo cálculo do escoamento) e o pós-processador, que oferece a visualização dos resultados do escoamento, com saídas gráficas e alfanuméricas. As simulações em CFD voltadas para o ambiente construído podem fazer análises de qualidade do ar, ventilação artificial, bem como predição da ventilação natural (TRINDADE; PREDRINI; DUARTE, 2010).

O modelo para simulação em CFD é composto por uma malha construída a partir do volume que o fluido ocupa em uma geometria, na qual são inseridas as condições de contorno. Um sistema de equações diferenciais parciais de Conservação da Massa, Conservação do Momento Linear e Conservação de Energia é então resolvido numericamente para cada nó da malha. Por fim, são gerados os resultados por meio de imagens e dados numéricos.

Construção da geometria e malha

O modelo CFD do caso simulado neste trabalho foi construído com a mesma configuração geométrica que o caso simulado no EnergyPlus. Porém, no modelo CFD não foi preciso ‘desenhar’ os pavimentos abaixo ou acima do pavimento analisado.

Para a simulação de ventilação natural foi necessária a modelagem da geometria em dois domínios computacionais⁵: um externo e outro interno. A

⁴ Dados de saída são dados horários fornecidos pelo programa após sua execução. Trata-se dos resultados não processados das condições do ambiente simulado ou dos padrões definidos pelo usuário.

geometria do modelo externo representa o escoamento atmosférico, ou seja, é utilizada para modelar o escoamento do ar ao redor do ambiente de interesse. A cavidade e a camada externa da fachada dupla foram modeladas neste domínio. O domínio interno representa o ambiente interno, com suas aberturas. Esta forma de modelagem partiu do modelo proposto por Neto *et al.* (2011) conforme apresentado na seção 2.6.1 (Simulação computacional de Fachadas Duplas), com as devidas adaptações para a fachada dupla.

Para o processo de modelagem da geometria do ambiente com a fachada dupla, foi usado o programa SOLIDWORKS, que é um software de modelagem tridimensional. Os modelos geométricos desenhados no programa SOLIDWORKS são apresentados na Figura 14.

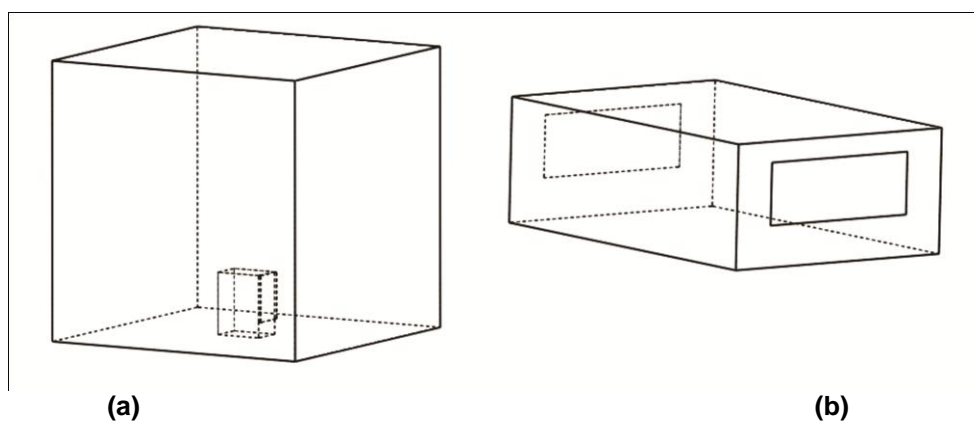


Figura 14 – Modelos da geometria: (a) do domínio externo; (b) domínio interno.

Para cada uma dessas geometrias, ou domínios, foram geradas malhas na plataforma de modelamento Workbench do programa Ansys CFX. A malha pode ser entendida como a divisão do espaço num conjunto de volumes elementares nos quais o método numérico resolve um conjunto de equações básicas. Todas as simulações foram executadas usando malhas com estrutura tetraédrica para os domínios externos e hexadominante para os domínios internos. A Figura 15 mostra um exemplo das malhas geradas para simulação.

⁵ Domínio computacional corresponde à região do escoamento de ar.

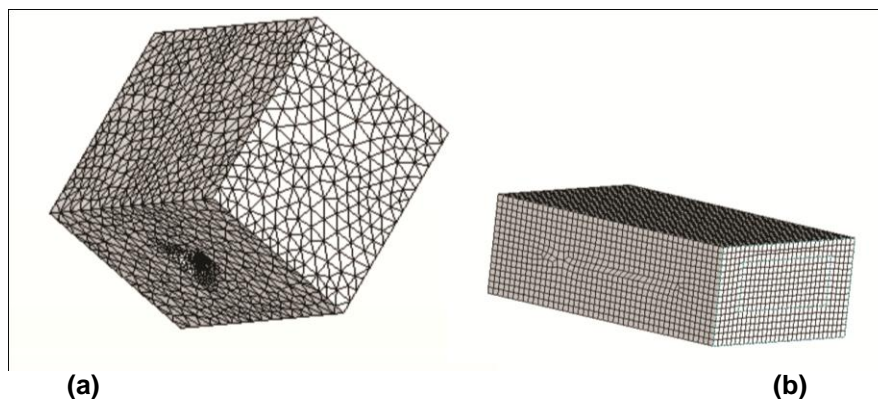


Figura 15 – Exemplo de malhas geradas: (a) do domínio externo; (b) do domínio interno.

Inserção das condições de contorno e execução dos modelos

Para simular a ventilação natural pelo efeito chaminé, as condições de contorno inseridas no Ansys CFX PRE foram retiradas do programa EnergyPlus. Nesta etapa, os domínios interno e externo foram agrupados pelo programa resultando na configuração: ambiente interno + fachada dupla + espaço atmosférico.

As fronteiras do domínio externo foram modeladas como aberturas, sendo somente a base modelada como parede. O domínio interno teve as duas janelas modeladas como aberturas. As faces da cavidade e do ambiente interno foram modeladas como parede e com as temperaturas superficiais retiradas do EnergyPlus. Além disso, para permitir o escoamento do ar entre os dois domínios foi necessário inserir a condição de interface entre as aberturas (janelas) do ambiente interno e as faces do domínio externo que estão em contato com o domínio interno. O Quadro 3 resume as condições de contorno utilizadas e a Figura 16 mostra um exemplo do modelo configurado no Ansys CFX PRE.

Quadro 3 - Características das condições de contorno utilizadas nas simulações.

Domínio	Face	Tipo de condição de contorno
Externo	Laterais e topo	Abertura
Externo	Base e cavidade	Parede com temperatura constante
Interno	Paredes	Parede com temperatura constante
Interno	Janelas	Aberturas

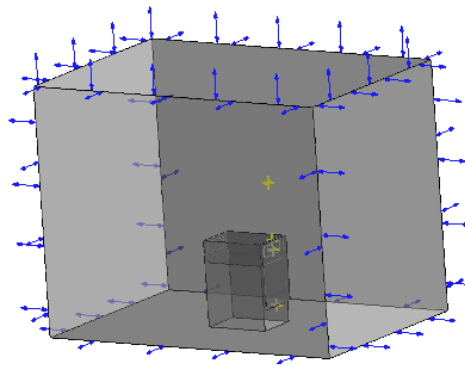


Figura 16 – Exemplo do modelo configurado no ANSYS CFX PRE.

Os modelos foram executados no Ansys CFX SOLVER sob regime transiente⁶. O intervalo de tempo que o programa faz uma simulação completa (*time step*) foi de 1s e tempo total de 300s. O modelo de turbulência utilizado foi o k- ϵ (standart).

3.2.3 Testes de validação para o programa CFD

Nos processos de geração de malha, inserção de condições de contorno nas malhas e solução das equações podem não ocorrer convergências para resultados corretos, o que muitas vezes é de difícil detecção. Para diminuir o grau de incerteza da simulação CFD, algumas práticas ajudam a verificar a coerência dos resultados. Entre elas estão: testes de refinamento de malha, análise de sensibilidade das variáveis, comparação com resultados de modelos analíticos conhecidos, comparação com dados experimentais, dentre outros.

No caso específico de simulação de fachadas duplas, há poucos resultados de modelos analíticos e/ou experimentais para que seja feita comparação. Dentro desta perspectiva, a análise dos resultados por meio de testes de refinamento de malha, de sensibilidade das variáveis e comparação com modelo analítico colaborou para verificação da convergência do modelo CFD adotado.

Teste para dimensionamento do domínio externo

O domínio externo, cuja geometria simula o escoamento atmosférico, foi primeiramente modelado com área de 54m x 54m e altura de 54m. Devido ao grande número de elementos gerados em sua malha, o tempo de simulação

⁶ Regime transiente refere-se à simulação que considera as mudanças no comportamento do fluido ao longo do tempo.

demandado foi de aproximadamente 14 horas (usando microcomputador com processador Core2Duo de 3GHz). Para diminuir o custo computacional, foram feitos dois domínios externos menores. A Tabela 2 contém a relação entre os domínios interno e externo. É importante ressaltar que todos os casos possuem as mesmas condições de contorno.

Tabela 2 – Características geométricas dos domínios externos modelados.

Domínio	Relação de largura	Relação de comprimento	Relação de altura	Tempo de execução
1 (maior)	9	6	4.5	14 horas
2 (médio)	5	5	2.9	7 horas
3 (menor)	3	2	2.5	6 horas

Partiu-se do princípio de que o caso com tamanho do domínio externo maior é considerado o mais apto em permitir o escoamento do ar ao redor do edifício e, conseqüentemente no interior do ambiente. A análise dos resultados dos três casos mostra que a vazão de ar encontrada na abertura do ambiente no caso 1 (maior) é de $0,256\text{m}^3/\text{s}$, enquanto que a vazão encontrada no caso 2 (médio) foi de $0,252\text{m}^3/\text{s}$ – 2% menor que o caso de referência. Porém, para o caso 3 (menor), o valor da vazão encontrada na abertura foi de $0,236\text{m}^3/\text{s}$ – 8% menor que o caso 1.

Com relação ao tempo de execução, os casos 2 e 3 não tiveram diferença significativa: aproximadamente 7 e 6 horas respectivamente, conforme Tabela 2. Assim, o tamanho do domínio externo ‘médio’ foi o usado para a modelagem dos demais casos.

Teste de refino de malha

O teste de refinamento de malha consiste em começar as simulações em malhas mais grosseiras e a cada etapa repetir a simulação em uma malha mais fina. Isso gera um aumento do número de elementos na malha, e conseqüentemente, diminuição do tamanho dos elementos. O teste tem o intuito de verificar qual o maior volume básico de malha que pode ser utilizado sem que haja diferença apreciável do escoamento de ar em comparação com volumes menores. As simulações em malhas com sucessivos refinamentos devem mostrar convergência da solução conforme o espaçamento de malha diminui. A necessidade de refinamento da malha, para captar regiões de gradientes elevados, como a cavidade da fachada dupla, torna o cálculo computacional algumas vezes inviável. Uma alternativa para contornar este problema pode ser por meio da utilização de malhas refinadas apenas na região das faces que

limitam a cavidade. Deste modo, nas faces da cavidade da fachada dupla, foram determinados tamanhos de elementos ainda menores que as demais faces da geometria.

Para determinação das dimensões dos elementos serem usados na simulação de fachadas duplas, foram feitas malhas com refinamentos variados. Três grupos de refinamento foram definidos: A) variação do tamanho da malha do domínio externo; B) variação do tamanho da malha envolta das faces da cavidade da fachada dupla; C) variação do tamanho da malha do domínio interno.

Inicialmente, determinou-se uma malha padrão em que a atmosfera do domínio externo tivesse refinamento de 0,7m, as faces da cavidade refinamento de 0,07m e o domínio interno refinamento de 0,2. A partir desses valores optou-se por diminuir o tamanho do elemento em 20%, depois em mais 20% e em seguida aumentar 20% em cada malha. A Tabela 3 apresenta os três grupos com as respectivas características das malhas geradas para os domínios internos e externos.

Tabela 3 – Modelos para teste de refinamento de malha.

Modelo	Diminuição em %	Tamanho médio dos elementos			Número total de elementos
		Domínio externo: atmosfera (m)	Domínio externo: faces da cavidade (m)	Domínio interno (m)	
Grupo A					
1	+20%	0,84	0,070	0,20	380.725
2	Padrão	0,70	0,070	0,20	454.658
3	-20%	0,56	0,070	0,20	612.838
4	-20%	0,45	0,070	0,20	não gerado
Grupo B					
1	+20%	0,70	0,084	0,20	339.330
2	Padrão	0,70	0,070	0,20	454.658
3	-20%	0,70	0,056	0,20	664.968
4	-20%	0,70	0,045	0,20	não gerado
Grupo C					
1	+20%	0,70	0,070	0,250	444.822
2	Padrão	0,70	0,070	0,200	454.658
3	-20%	0,70	0,070	0,160	477.104
3	-20%	0,70	0,070	0,128	517.575

Teste de coerência com modelo analítico

A equação 01 (ASHARE, 2005) descreve a vazão de ar em uma abertura provocada pelo efeito chaminé. Na tentativa de confrontar os dados de vazão na abertura (janela) encontrados nas simulações com esse modelo analítico, foi

feito um exercício para verificar a coerência dos dados encontrados nos dois modelos.

$$Q = C_D A \sqrt{\frac{2g\Delta H_{NPL}(t_i - t_o)}{t_i}} \quad \text{Equação 01}$$

De acordo com a equação, a vazão devido ao efeito chaminé é função da área de abertura para escoamento (A) e do coeficiente de descarga⁷ (C_D), dentre outros. Devido à incerteza dessas variáveis nos modelos simulados, o exercício apresentado neste trabalho confronta apenas a segunda parte da equação, que aborda altura (H) percorrida pelo ar e a diferença de temperatura do ar (ΔT). As vazões obtidas pela equação estão em função dos valores de A e C_D , não sendo, portanto, possível verificar a semelhança das vazões encontradas na simulação com as calculadas por meio da equação. O teste permitiu examinar a similaridade na tendência entre os valores extraídos do programa com os calculados.

3.3 Análise de sensibilidade da variável ‘Temperatura da camada externa da fachada’

Esta etapa abordou o potencial da ventilação do ambiente a partir da análise de sensibilidade de duas variáveis: temperatura do ar da atmosfera e temperatura superficial da camada externa da fachada. Este caso deu subsídios para verificar, no ano completo, o que a fachada dupla pode contribuir em termos de ventilação para um ambiente no clima tropical de altitude. Esse procedimento não restringe a avaliação a apenas um determinado clima e permite que seja feita para outras condições climáticas também.

Além disso, sabe-se que analisar sensivelmente as variáveis para verificar a coerência do modelo CFD é importante, pois permite verificar a coerência da simulação. Assim, este procedimento serviu para verificar as alterações provocadas no modelo de acordo com as mudanças nas condições de contorno.

O método consistiu em variar a temperatura inicial da superfície interna (face com a cavidade) da camada externa da fachada (camada de vidro em destaque mostrada na Figura 17), mantendo constante (25°C) a temperatura do

⁷ O coeficiente de descarga representa a resistência do fluxo de ar ao escoamento.

ar da atmosfera, do ar do ambiente interno, das faces do ambiente interno e das demais faces da fachada.

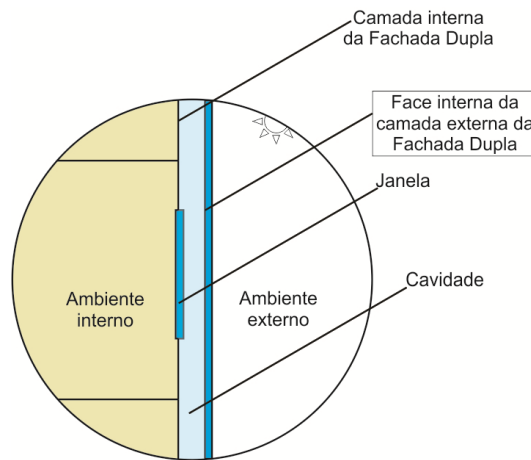


Figura 17 – Detalhe da geometria com destaque para a face interna da camada externa da fachada.

A Tabela 4 apresenta os valores de temperatura superficial inseridos como condições de contorno no programa. Foram simuladas três condições que provocam diferentes fenômenos no ambiente com fachada dupla:

- Temperatura da camada externa mais baixa que as demais;
- Temperatura da camada externa igual às demais;
- Temperatura da camada externa mais alta que as demais.

Tabela 4 - Características dos modelos para a análise de sensibilidade de variáveis para o método 1.

Modelo	Temperatura da camada externa da fachada (°C)	Temperatura das demais superfícies da fachada (°C)	Temperatura das superfícies do ambiente interno (°C)	Temperatura inicial do ar interno e da atmosfera (°C)
1	15	25	25	25
2	17	25	25	25
3	20	25	25	25
4	23	25	25	25
5	25	25	25	25
6	27	25	25	25
7	30	25	25	25
8	35	25	25	25
9	40	25	25	25

A partir da diferença de temperatura entre a superfície da camada externa e do ar do exterior (ΔT) e das vazões obtidas em cada caso, foi possível obter uma correlação entre ΔT e vazão na abertura. Como o EnergyPlus permite a extração da diferença de temperatura entre a superfície da camada externa e do

ar do exterior para o ano inteiro, foram realizados exercícios que identificaram o potencial de ventilação para o modelo.

Como forma de complementar o trabalho, foram simulados também mais dois casos em que as aberturas estão situadas nos pavimentos 2 e 4. Sabendo que a altura da cavidade é fator determinante para as vazões de ar nas aberturas, estes casos foram modelados com o ΔT de 5°C (sendo a temperatura da camada externa 30°C e as demais 25°C), como o modelo 7 da Tabela 4. A Tabela 5 apresenta os modelos que variam os pavimentos analisados com as respectivas alturas da cavidade acima e abaixo da janela. Neste caso, a linha média da janela foi considerada como ponto de referência. Cabe ressaltar que o primeiro pavimento não possui a camada externa à sua frente e, portanto o ambiente não fez parte dessa análise.

Tabela 5 – Especificações dos modelos para o teste de análise de sensibilidade de variáveis para altura da cavidade.

Modelo	Pavimento	Altura da cavidade acima da janela	Altura da cavidade abaixo da janela
1	Segundo	7,25m	1,75m
2	Terceiro	4,25m	4,75m
3	Quarto	1,25m	7,75m

Os resultados encontrados nas simulações foram confrontados com a equação da ASHARE (2005) que descreve o fluxo de ar causado somente pelo efeito da chaminé térmica, dando maior confiabilidade dos resultados extraídos do programa.

Sabe-se que é improvável que em uma situação real na arquitetura, a temperatura do ambiente externo ou interno, ou ainda, as temperaturas das superfícies e do ar, sejam exatas, como os modelos simulados na etapa descrita em 3.3. Assim, optou-se por modelar e simular casos de momentos específicos/representativos em que as condições de contorno fossem mais próximas da realidade. Além da temperatura superficial da camada externa e do ar exterior, as temperaturas superficiais das demais faces da cavidade, das paredes do ambiente e do ar do ambiente interno foram retirados do programa EnergyPlus como condições de contorno para o CFD.

3.4 Definição de casos representativos das condições climáticas do clima tropical de altitude

Estes modelos possuem as condições de contorno (temperaturas) retiradas do EnergyPlus, simulando uma situação mais próxima da realidade.

Porém é preciso lembrar que estes casos foram modelados sem outras fontes de calor presentes no ambiente como a presença de pessoas, equipamentos e iluminação, por exemplo. Apesar de serem mais próximos de uma edificação real, os modelos foram simulados com a ausência de alguns dados. Assim, os resultados obtidos levam em consideração apenas a contribuição das diferenças de temperatura nas superfícies e no ar para ventilação local.

O processo usado nesta etapa consistiu em duas fases de simulação. A primeira fase, que usou o programa EnergyPlus, considerou a modelagem de um ambiente com fachada dupla com avaliação das condições climáticas locais e os materiais do ambiente construído. Nesta fase, foram extraídas do programa, as condições de contorno para serem inseridas no programa Ansys CFX (CFD). A segunda fase permitiu a análise das condições de escoamento do ar no ambiente interno em função da fachada dupla.

O programa EnergyPlus é capaz de simular as condições do ambiente construído durante todas as horas do ano. Contudo, o programa CFD analisa apenas uma condição específica. Nesta pesquisa, a simulação em CFD mostra os resultados durante 5min no tempo, sendo necessário determinar alguns momentos representativos do ano.

Para a definição desses momentos, foram selecionadas as horas com temperaturas da camada externa da fachada mais quentes e mais frias do período de inverno e verão que ocorreram das 8h até às 18h. O método para selecionar estas horas/momentos específicos foi baseado na frequência de ocorrência das temperaturas superficiais da face interna da camada externa da fachada dupla avaliadas a cada 1°C de intervalo para o período de inverno (21 de junho a 23 de setembro) e de verão (21 de dezembro a 21 de março), separadamente.

A partir da frequência de ocorrência das temperaturas superficiais da camada externa, foram eliminados os 5% dos dados de temperatura mais baixa e os 5% dos dados de temperatura mais alta da camada externa da fachada. Foi possível delimitar os extremos mínimos e máximos das temperaturas superficiais do vidro da camada externa da fachada dupla, a partir do intervalo de dados remanescentes. Assim, foram identificados os valores extremos da temperatura da camada externa, para o verão e o inverno. A Figura 18 apresenta um esquema com o processo de determinação das condições extremas mínimas e máximas de inverno e verão.

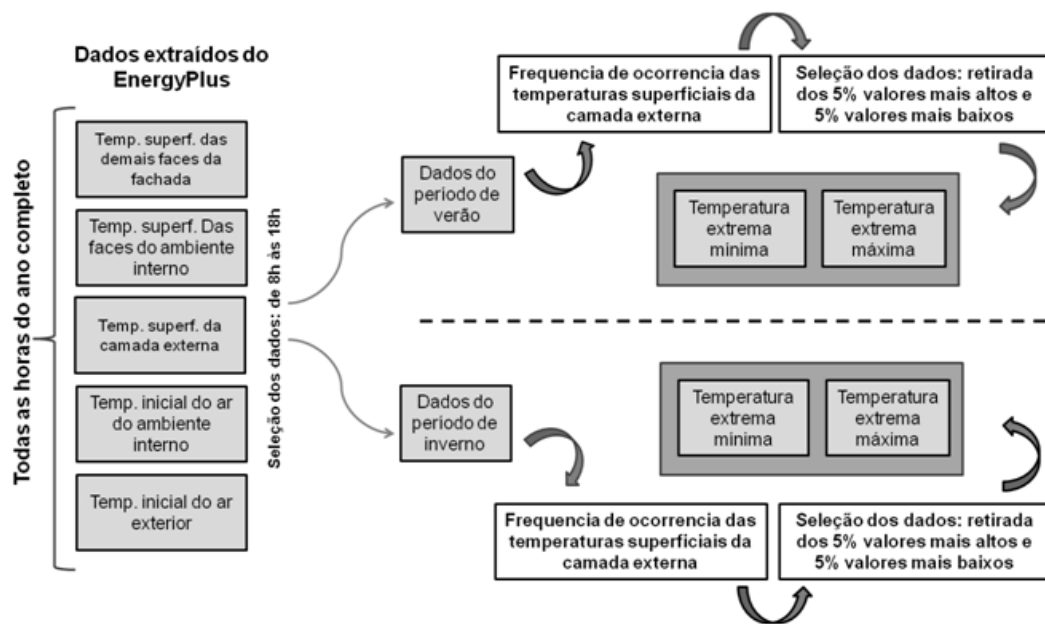


Figura 18 – Processo para determinação das condições de contorno para extremos mínimo e máximo para verão e inverno.

Após a determinação dos valores mínimos e máximos das temperaturas superficiais da camada externa da fachada, foram identificadas as temperaturas das demais superfícies e do ar. Para isso, foram calculadas as médias das temperaturas superficiais das faces da camada externa da fachada, das faces do ambiente interno, das temperaturas do ar do ambiente interno e da atmosfera quando o intervalo da temperatura da camada externa da fachada está até 0,9°C acima da temperatura identificada como extrema.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta as análises dos resultados das simulações descritas na metodologia. São apresentadas primeiramente as análises obtidas com o teste de refinamento de malha, seguidas pelos resultados do teste de coerência com o modelo analítico. Apresenta-se, então a correlação obtida entre a vazão de ar e a diferença de temperatura entre a camada externa da fachada e do ar exterior com os exercícios que usaram dados do arquivo climático de Viçosa. Em seguida, apresentam-se as vazões obtidas considerando as aberturas em diferentes pavimentos. Por fim, são apresentados os resultados das simulações que consideraram os modelos com condições de contorno representativas para inverno e verão. A Figura 19 apresenta um esquema com a sequência da apresentação dos resultados.

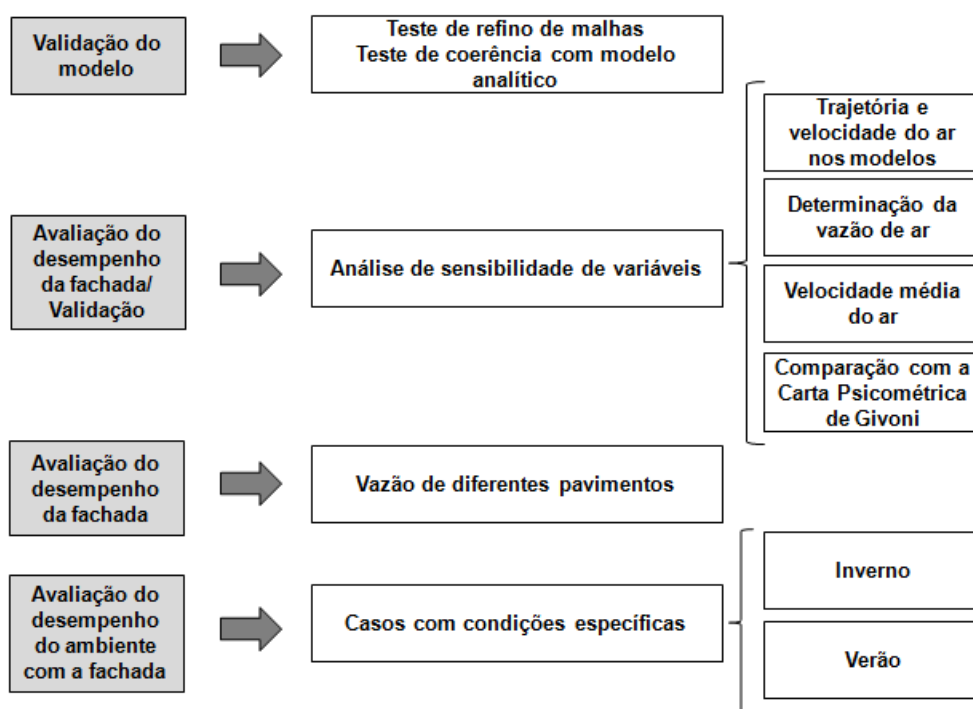


Figura 19 – Esquema de apresentação dos resultados.

Os resultados gráficos gerados pelo programa CFD estão apresentados em planos bidimensionais horizontais (plantas baixas) e verticais (cortes) para facilitar sua visualização. Os vetores e contornos apresentados em planta correspondem a um plano horizontal localizado a 1,5m de altura do piso do ambiente. As imagens apresentadas em corte correspondem a um plano longitudinal que passa pelo centro da abertura (janela).

4.1 Testes de validação do modelo CFD

4.1.1 Teste de refinamento de malhas

Na definição da malha mais adequada para as simulações, foi feito o teste de refinamento de malhas, que consiste em começar com simulações em malhas mais grossas e a cada etapa repetir a simulação em uma malha mais fina, com maior número de elementos, conforme discutido na seção 3.2.2. Neste caso, os modelos '2' (Tabela 7) das malhas do domínio externo (grupo A), das faces da cavidade (grupo B) e do domínio interno (grupo C) foram usados como base (padrão) para as análises.

A Tabela 7 apresenta a vazão calculada pelo programa na abertura (janela) do ambiente e a diferença (em porcentagem) dos resultados encontrados em relação aos casos mais finos. Nos casos dos grupos A e B, os refinamentos foram cessados nos valores 0,56m e 0,056m, pois malhas mais finas 20% (0,45m e 0,045m) não foram processadas até a finalização da geração da malha.

Tabela 6 – Dados de vazão encontrados nos testes de refinamento de malhas.

Grupo	Modelo	Malha domínio externo (m)	Malha das faces da cavidade (m)	Malha do domínio interno (m)	Vazão na abertura (m ³ /s)	% em relação ao anterior
A	1	0,88	0,07	0,20	0,480	-
	2	0,70	0,07	0,20	0,439	- 8,5%
	3	0,56	0,07	0,20	0,422	- 3,9%
	4 (não gerado)	0,45	0,07	0,20	-	-
B	1	0,70	0,088	0,20	0,399	-
	2	0,70	0,070	0,20	0,439	+ 10%
	3	0,70	0,056	0,20	0,473	+ 7,7%
	4 (não gerado)	0,70	0,045	0,20	-	-
C	1	0,70	0,070	0,250	0,438	-
	2	0,70	0,070	0,200	0,439	+ 0,2%
	3	0,70	0,070	0,160	0,438	- 0,2%
	4	0,70	0,070	0,128	0,438	0,0%

O modelo 2 (0,70m) do grupo A possui a vazão de ar na abertura 8,5% menor que o caso mais grosso. Entre os modelos 2 e 3 essa diferença foi menor (3,9%). Além disso, observou-se que há maiores discontinuidades na malha menos refinada, conforme observado na Figura 20. O caso mais fino, que possui tamanho do elemento em média 0,56m (modelo 3, grupo A) foi o escolhido como o adequado à malha do domínio externo.

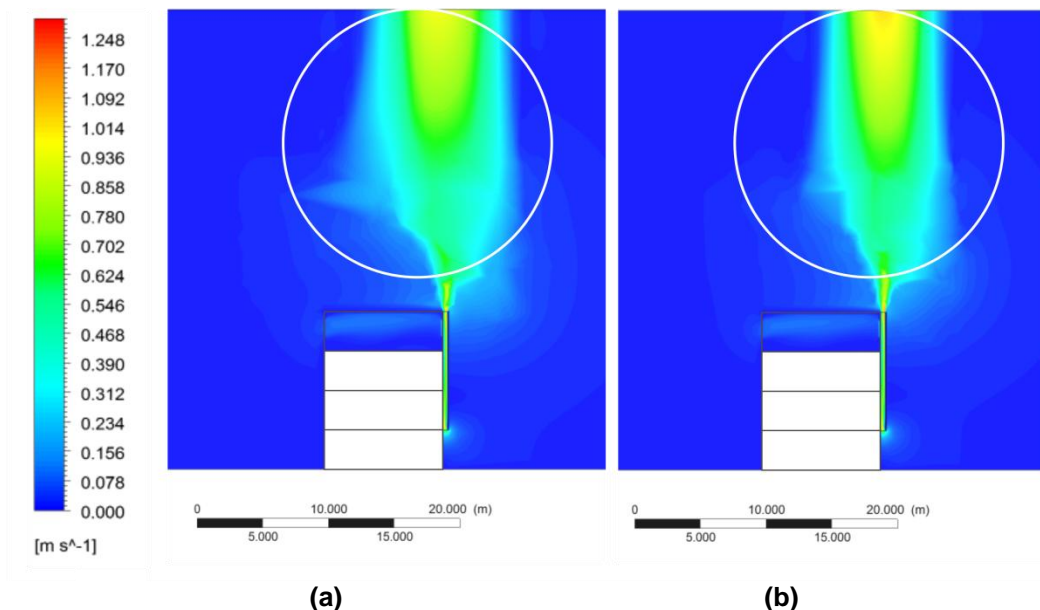


Figura 20 – Resultados com refinamento da malha do domínio externo: (a) menos refinada e (b) mais refinada.

Em relação à malha próxima às faces da cavidade da fachada dupla (grupo B), optou-se por manter o refinamento do caso base (0,07m), pois este tamanho de malha permite a inserção de aproximadamente 6 elementos no interior da cavidade (que possui 40cm de largura), enquanto que o caso com tamanho de malha de 0,056 permite inserir aproximadamente 7 elementos (apenas 1 elemento a mais que o caso anterior).

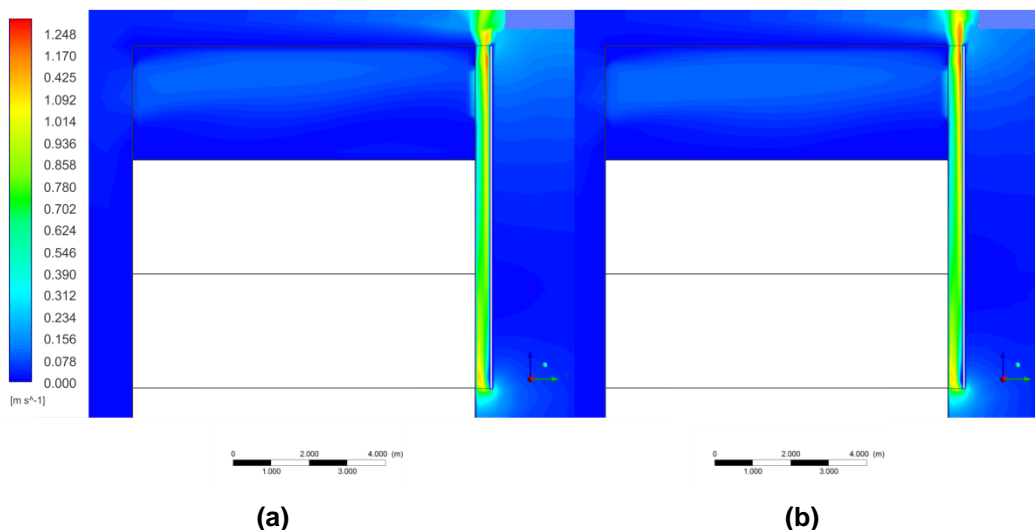


Figura 21 – Resultados com refinamento da malha próxima da cavidade, com tamanho do elemento de (a) 0,07m e (b) 0,056m.

Além disso, os contornos de velocidade para um plano que passa pelo centro do ambiente permitem visualizar pouca diferença entre os dois casos

(Figura 21). Assim, foi selecionado o refinamento que possui o corpo do domínio externo de 0,56m e as faces da fachada dupla de 0,07m.

Para o refinamento do domínio interno, observou-se que não houve diferenças entre os resultados da vazão do modelo com malha mais fina, para o modelo com malha mais grossa. Também não foi verificada diferença significativa entre os resultados gráficos, conforme mostrado na Figura 22, que apresenta contornos de velocidade para um plano horizontal no domínio interno. Tendo em vista que o número de elementos do modelo 1 (0,250m) possui apenas 0,2% de diferença em relação ao modelo 2 (0,200m), optou-se por descartar o modelo com malha mais grossa, usando para as simulações, o tamanho da malha do domínio interno de 0,200m.

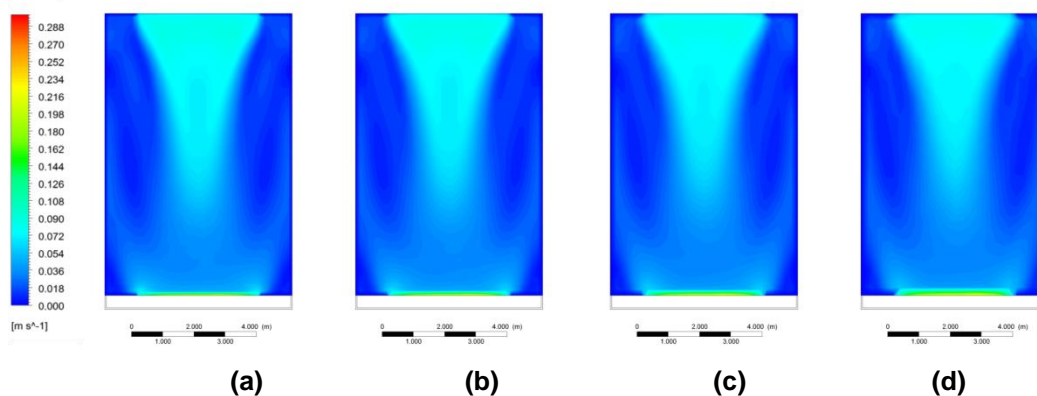


Figura 22 - Resultados com refinamento da malha do domínio interno, com tamanho do elemento de: (a) 0,128m, (b) 0,160m, (c) 0,200m e (d) 0,250m.

Os testes determinaram os valores para o refino das malhas a serem usadas no modelo para simulação. As simulações foram executadas com os seguintes tamanhos dos elementos das malhas:

- Corpo do domínio externo = 0,56m;
- Faces da cavidade do domínio externo = 0,07m;
- Corpo do domínio interno = 0,20m.

4.1.2 Teste de coerência com modelo analítico

Para verificar a coerência dos dados encontrados no programa, foi calculada para cada modelo, a vazão de ar pela abertura devido ao efeito chaminé, em função da área de abertura para escoamento (A) e do coeficiente

de descarga⁸ (C_D). As vazões calculadas (Q_{calc}), que estão em função dos valores de A e C_D , foram confrontadas com os valores de vazão obtidos a partir da simulação (Q_{sim}). Não foi possível verificar a coerência dos valores de vazão em si, mas apenas a relação entre eles, pela falta dos valores de C_D e A . As Tabelas 7 e 8 mostram as relações obtidas pelos dados de vazão de ar calculado e simulado quando a temperatura da camada externa é menor e maior ou igual à temperatura do ar da atmosfera, respectivamente.

Não foi possível determinar com exatidão o valor da altura da chaminé térmica, ou $H(m)$. A ASHARE (2005) recomenda que, se a janela representa uma alta fração (aproximadamente 90%) da área total da superfície da fachada, a linha neutra de pressão pode ser considerada na meia altura da abertura. Porém, no caso modelado, a abertura não representa alta fração da área total da fachada, sendo menor que 90%, e, portanto, o caso não se enquadra no recomendado pela ASHARE (2005). Como não foi possível obter a linha de pressão neutra a partir da simulação, optou-se por adotar o valor de H como sendo à meia altura da abertura (janela), com ressalva de sua incerteza.

Tabela 7 – Vazões de ar pelas aberturas obtidas pelo programa CFD e calculada pela equação que trata da vazão por efeito chaminé para temperatura da camada externa < temperatura do ar da atmosfera.

$T_{camada\ ext.}\ (^{\circ}C)$	$T_{atmosfera}\ (^{\circ}C)$	$H\ (m)$	$Q_{calc}\ (m^3/s)$	$Q_{sim}\ (m^3/s)$	Q_{calc}/Q_{sim}
15	25	4,25	$1,672 * C_D * A$	0,476	$3,51 * C_D * A$
17	25	4,25	$1,496 * C_D * A$	0,422	$3,54 * C_D * A$
20	25	4,25	$0,183 * C_D * A$	0,327	$3,62 * C_D * A$
23	25	4,25	$0,748 * C_D * A$	0,209	$3,58 * C_D * A$

Tabela 8 – Vazões de ar pelas aberturas obtidas pelo programa CFD e calculada pela equação que trata da vazão por efeito chaminé para temperatura da camada externa >= temperatura do ar da atmosfera.

$T_{camada\ ext.}\ (^{\circ}C)$	$T_{atmosfera}\ (^{\circ}C)$	$H\ (m)$	$Q_{calc}\ (m^3/s)$	$Q_{sim}\ (m^3/s)$	Q_{calc}/Q_{sim}
25	25	4,75	$0,000 * C_D * A$	0,000	$0,00 * C_D * A$
27	25	4,75	$0,788 * C_D * A$	0,209	$3,77 * C_D * A$
30	25	4,75	$1,240 * C_D * A$	0,278	$4,46 * C_D * A$
35	25	4,75	$1,739 * C_D * A$	0,394	$4,41 * C_D * A$
40	25	4,75	$2,113 * C_D * A$	0,480	$4,40 * C_D * A$

⁸ O coeficiente de descarga representa a resistência do fluxo de ar ao escoamento. Apesar do desconhecimento deste coeficiente no modelo, é possível obtê-lo a partir de experimentos com túneis de vento, por exemplo.

Nos casos em que a temperatura da camada externa é menor que as demais, a vazão calculada e a vazão encontrada na simulação apresentam aproximadamente a mesma relação, sendo o valor do quociente variando entre 3,51 e 3,62. Da mesma forma, para os casos em que a temperatura da camada externa é maior que as demais, o quociente das vazões calculadas sobre as vazões encontradas nas simulações possuem também pequenas diferenças, variando entre 3,77 e 4,46. Essas relações sugerem que os resultados encontrados para os modelos simulados seguem a proporção do modelo para ventilação por efeito da chaminé térmica. Apesar da incerteza da linha neutra de pressão, que pode ser o fator responsável pela diferença entre os quocientes, o teste serviu para reforçar a consistência da simulação em CFD de fachadas duplas.

4.2 Análise de sensibilidade da temperatura da camada externa da fachada dupla

A movimentação do ar no ambiente com a fachada dupla ocorre pela diferença de temperatura entre o ar do ambiente, da cavidade e do meio externo. Quando o ar presente na cavidade possui temperatura maior que a temperatura do ambiente e do exterior, ele torna-se menos denso e seu escoamento tende a ser ascendente, tendo em vista o efeito provocado pelo fenômeno da chaminé térmica. Da mesma forma, quando a temperatura do ar da cavidade está mais baixa que as demais, o ar tende a descer. Nos dois casos, o deslocamento de ar da cavidade provoca um abalo no ar presente no ambiente, que tende a ocupar o ar deslocado. Assim, o efeito da diferença de temperatura entre a cavidade e o ambiente interno provoca movimentação de ar na edificação.

Os modelos desta etapa foram simulados com as malhas definidas na seção 4.1.1 e geraram dados numéricos de vazão de ar pelas aberturas e velocidade médias do ar no ambiente interno, conforme Tabela 9 que apresenta também a taxa de renovação de ar em cada caso.

A análise dos resultados obtidos nessas simulações é discutida na seção 4.2.1 (Trajetória e velocidade do ar nos modelos), o que mostra também as imagens geradas a partir delas. Esse banco de dados serviu ainda como referência para os resultados apresentados na seção 4.2.2 (Determinação da vazão de ar em função da diferença de temperatura entre o ar da atmosfera e a camada externa da fachada dupla).

Tabela 9 - Especificações dos modelos para o teste de análise de sensibilidade de variáveis.

Modelo	Temperatura da camada da camada externa da fachada (°C)	Temperatura das demais superfícies da fachada (°C)	Temperatura das superfícies do ambiente interno (°C)	Temperatura inicial do ar interno e da atmosfera (°C)	Vazão de ar pela abertura (m³/s)	Velocidade média do ar no ambiente interno (m/s)	Taxa de renovação de ar (h ⁻¹)
1	15	25	25	25	0,476	0,037	10,6
2	17	25	25	25	0,422	0,033	9,4
3	20	25	25	25	0,327	0,025	7,3
4	23	25	25	25	0,209	0,014	4,6
5	25	25	25	25	0,000	0,000	0,0
6	27	25	25	25	0,209	0,012	4,6
7	30	25	25	25	0,278	0,021	6,2
8	35	25	25	25	0,394	0,031	8,8
9	40	25	25	25	0,480	0,039	10,7

4.2.1 Trajetória e velocidade do ar nos modelos

Quanto à trajetória do escoamento, os modelos simulados seguiram a tendência esperada. Os modelos de 1 a 4 da Tabela 9 possuem as temperaturas da camada externa da fachada dupla mais baixas que as demais.

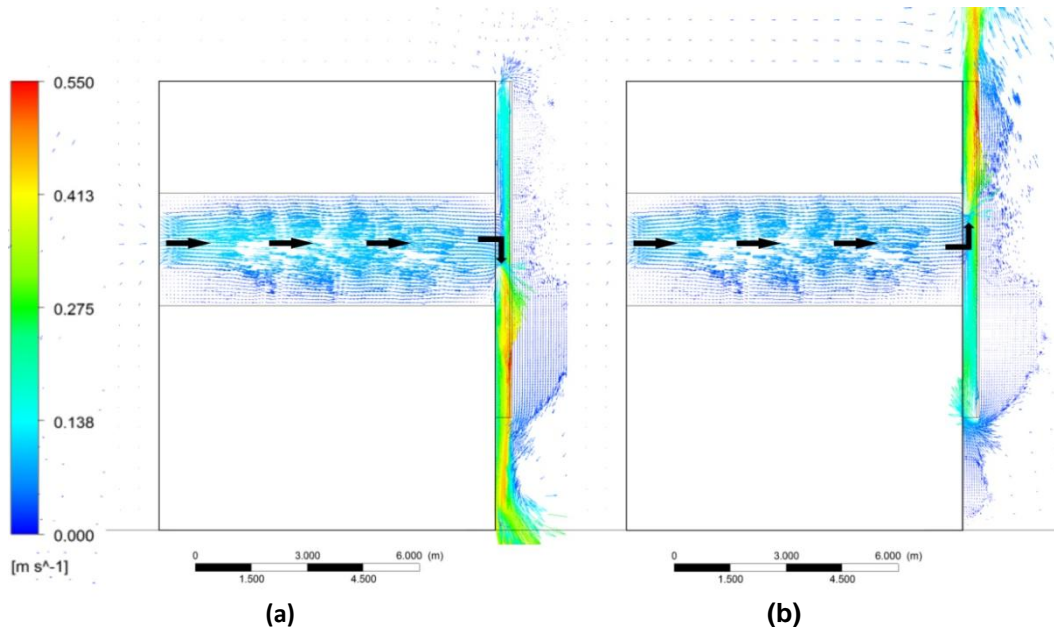


Figura 23 – Vetores de velocidade no modelo em corte para visualização da trajetória do ar para camada externa: (a) modelo 1 (15°C) e (b) modelo 8 (35°C).

Neste caso, o ar presente na cavidade está mais frio que o ar externo e do ambiente e, portanto mais denso, tendendo a descer, conforme Figura 23a

que apresenta, em corte, a visualização em corte dos vetores de velocidade para o modelo 1 da Tabela 9 (15°C). O ar que estava dentro do ambiente vai ocupar a cavidade e da mesma forma, o ar da atmosfera entra pela abertura da face sul para ocupar o ambiente.

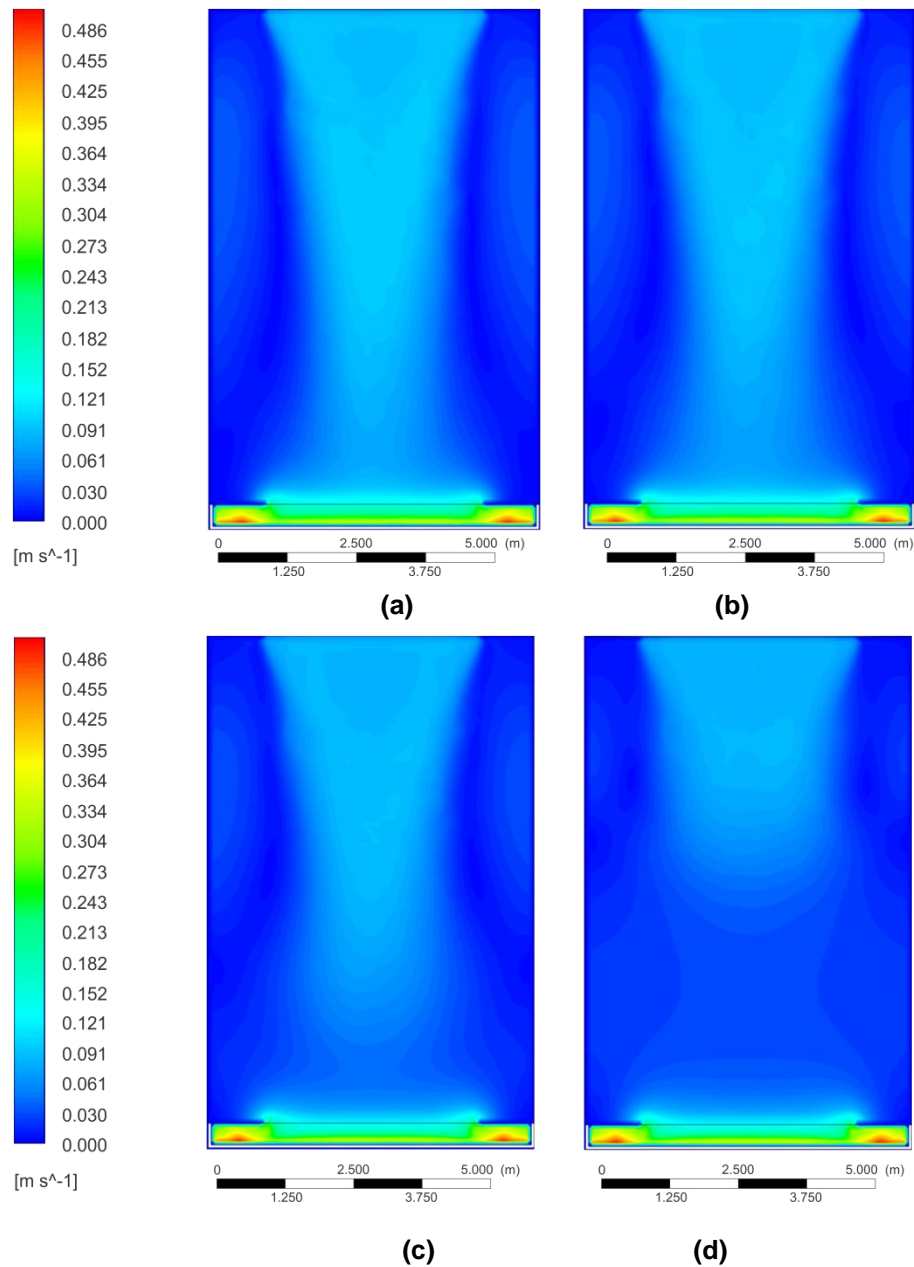


Figura 24 - Visualização de contornos de velocidade no modelo em planta baixa para diferentes temperaturas da camada externa: (a) 15°C, (b) 17°C, (c) 20°C e (d) 23°C.

Para os modelos de 6 a 9 da Tabela 9, a temperatura do ar presente na cavidade é mais alta que as demais e como sua densidade é mais baixa, o fluido tende a subir. Como nos demais casos, o ar presente no ambiente vai ocupar o

espaço da cavidade e assim, o ar externo tende a entrar pela abertura da fachada sul. A Figura 23b mostra as imagens em corte dos vetores de velocidade gerados no modelo 8 da Tabela 9 (35°C).

A Figura 24 apresenta os contornos de velocidade para um plano horizontal gerados a partir da simulação dos modelos 1 a 4. Nestes casos, houve uma diminuição da velocidade do ar à medida que a temperatura da camada externa da fachada se aproxima da temperatura do ar externo. Os pontos de maior velocidade do ar tendem a se concentrar na frente das janelas e mais próximos da abertura oposta à cavidade, que possui menos obstruções.

O modelo 5 possui tanto a temperatura da camada externa quanto as temperaturas das demais paredes e do ar a 25°C. Esse modelo foi simulado para verificar se o programa CFD usa somente a diferença de temperatura para realizar o escoamento de ar. Foi verificado que não houve movimentação de ar, conforme Figura 25, que apresenta contornos de velocidade para um plano situado no meio da janela em planta baixa.

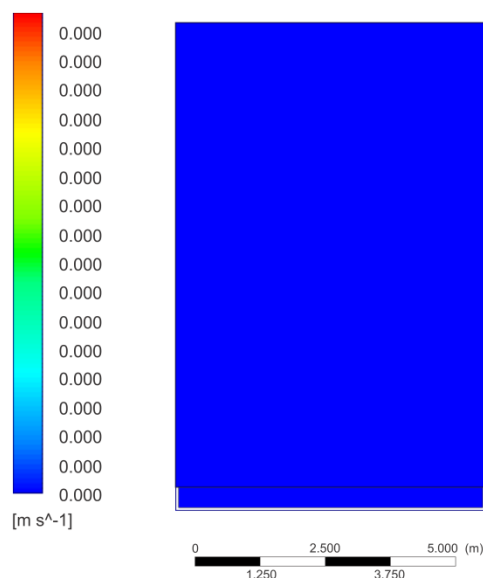


Figura 25 – Visualização de contornos de velocidade no modelo 5 em planta baixa.

Do modelo 6 ao 9, há um aumento gradativo da temperatura da camada externa, mantendo constantes as temperaturas das paredes do ambiente interno e do ar. Nestes casos, houve aumento gradativo da vazão de ar pelas aberturas e da velocidade média do ar em cada caso, conforme Tabela 9. Assim, foi possível observar que os resultados seguiram a tendência esperada. A Figura 25 apresenta as imagens geradas pelo programa Ansys CFX, dos contornos de velocidade do ar em um plano horizontal para os casos de 6 a 9. As imagens de

(a) a (d) da Figura 25 evidenciam o aumento da velocidade do ar no ambiente interior.

Da mesma forma que nos modelos de 1 a 4, os casos em que a temperatura da camada externa é maior que do ar externo (modelos 6 a 9) há aumento da velocidade do ar em função da diferença de temperatura entre o ar externo e a superfície da camada externa da fachada.

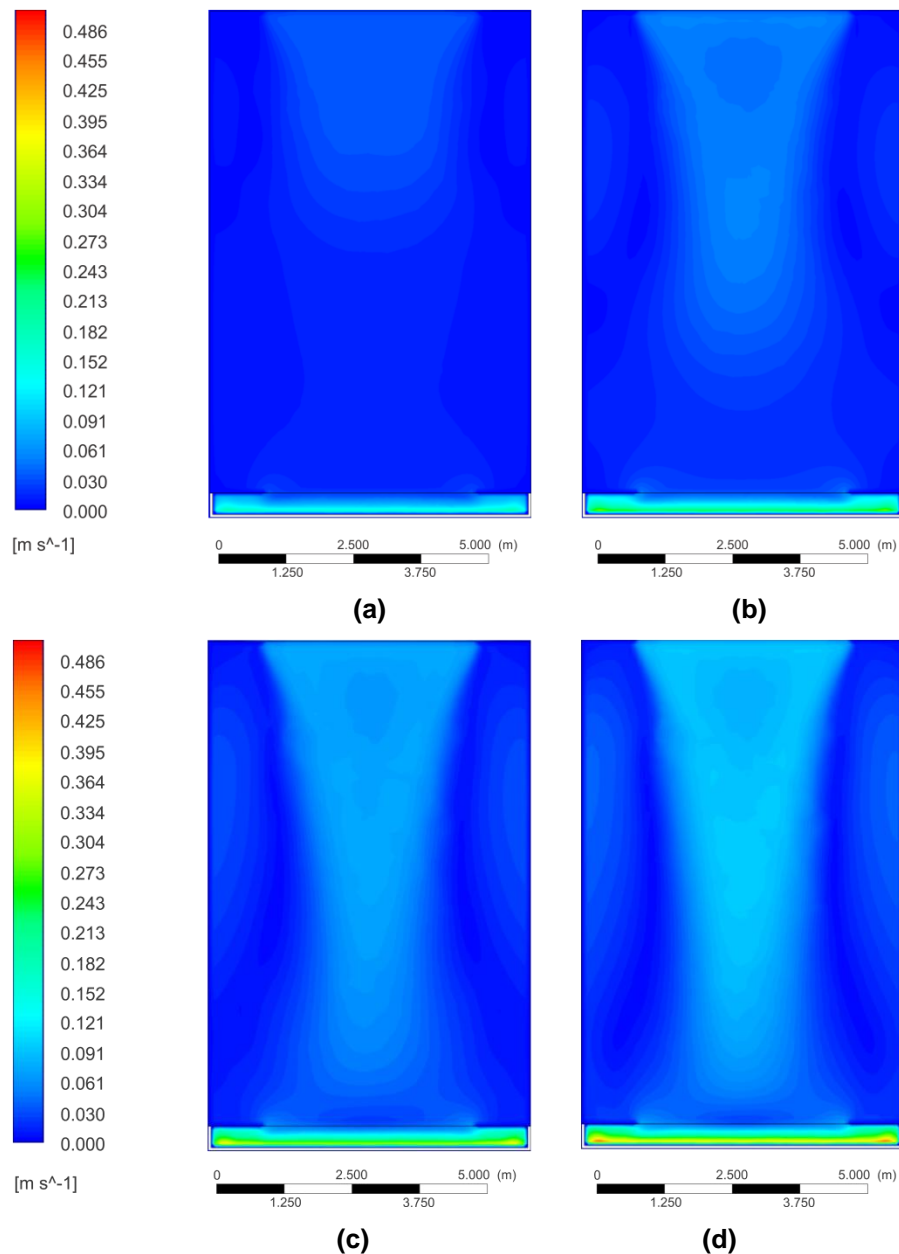


Figura 26 – Visualização de contornos de velocidade no modelo em planta baixa para diferentes temperaturas da camada externa: (a) 27°C, (b) 30°C, (c) 35°C e (d) 40°C.

O comportamento do ar no interior da cavidade e no ambiente ocorreu conforme o esperado, devido ao fenômeno do efeito chaminé. Assim, a trajetória

da movimentação do ar e o aumento da vazão e velocidade média do ar no ambiente conferem maior grau de confiabilidade à execução dos modelos.

4.2.2 Determinação da vazão de ar em função da diferença de temperatura entre o ar da atmosfera e a camada externa da fachada dupla

Por meio das vazões extraídas da simulação (Tabela 9), foi obtida a equação que descreve a relação da vazão na abertura de acordo com a diferença de temperatura entre a camada externa da fachada dupla (T_e) e do ar da atmosfera (T_{at}) (Tabela 10).

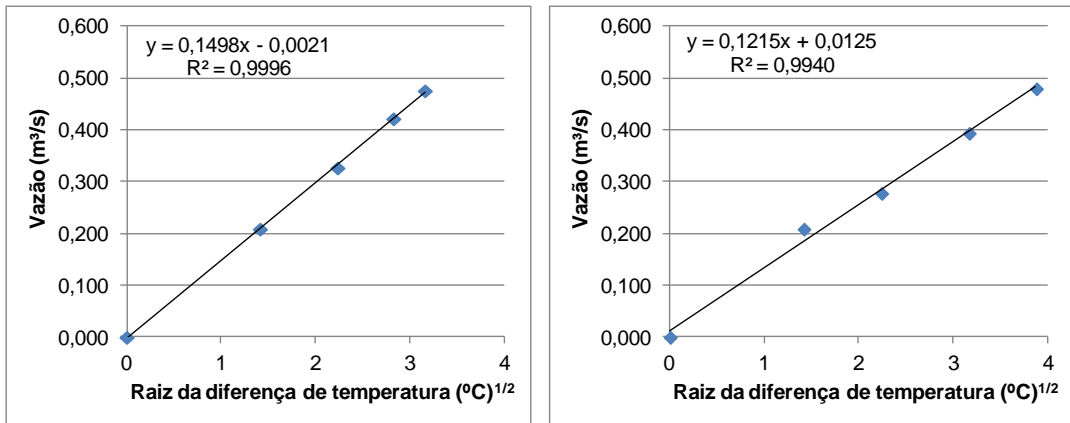
Tabela 10 – Vazão de ar extraídos dos resultados das simulações.

Modelo	Temperatura da camada externa T_e (°C)	Temperatura do ar da atmosfera T_{at} (°C)	Diferença de temperatura - ΔT ($T_e - T_{at}$)	Vazão de ar pela abertura (m^3/s)
1	15	25	-10	0,476
2	17	25	- 8	0,422
3	20	25	- 5	0,327
4	23	25	- 2	0,209
5	25	25	0	0,000
6	27	25	2	0,209
7	30	25	5	0,278
8	35	25	10	0,394
9	40	25	15	0,480

A diferença entre a vazão quando o ΔT é positivo e quando o ΔT é negativo deve-se à diferença na altura percorrida pelo ar, pois a abertura não está localizada exatamente no centro da fachada. Uma possível razão para essa diferença também possa ser devido à resistência à passagem de ar pelo piso.

Para verificar a tendência ao aumento da vazão ao longo do aumento da diferença de temperatura, foram encontradas regressões lineares para os modelos simulados. Duas correlações foram necessárias devido à diferença numérica a vazão quando ΔT é positivo e quando ΔT é negativo. Os resultados obtidos encontram-se na Figura 27, que apresenta a vazão em função da diferença de temperatura entre a camada externa da fachada e do ar da atmosfera.

A partir das regressões realizadas foi possível verificar que os modelos apresentaram bom ajuste dos dados, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,9996$ para ΔT negativo e $R^2 = 0,9940$ para ΔT positivo.



(a)

(b)

Figura 27 - Vazão em função da raiz da diferença de temperatura ($T_e - T_{at}$) para (a) $\Delta T \leq 0$ e (b) $\Delta T \geq 0$.

4.2.3 Vazão de ar pelas aberturas do ambiente com fachada dupla

As diferenças de temperatura ao longo do ano estão apresentadas na Figura 28, que mostra a frequência de ocorrência do intervalo de diferenças de temperatura da camada externa da fachada e do ar da atmosfera no clima de Viçosa. Foram selecionados apenas os dados correspondentes ao período 8h às 18h.

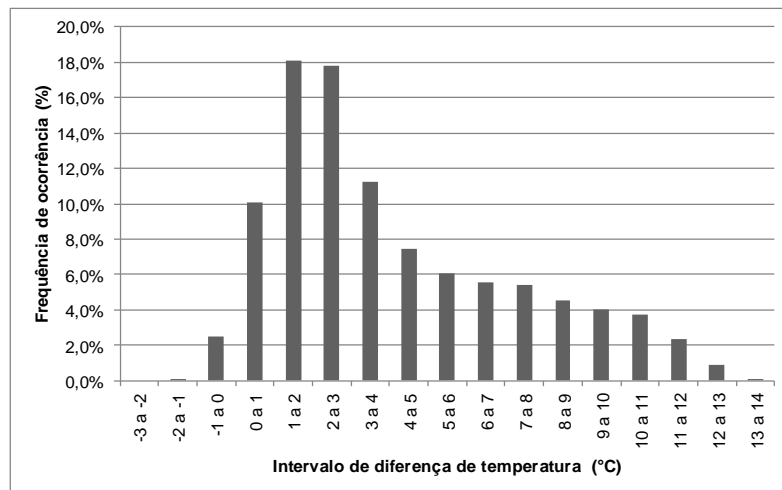


Figura 28 – Frequência de ocorrência de intervalos de diferença de temperatura entre a camada externa da fachada e o ar da atmosfera.

Em apenas 2,6% das horas do ano entre 8 e 18h, a temperatura da camada externa é menor que a da atmosfera e, portanto o ar percorre o sentido descendente na cavidade. Nos demais momentos, como a camada externa da fachada possui temperaturas mais altas que o ar externo, a trajetória do ar segue um movimento ascendente na cavidade.

Baixas diferenças de temperaturas ($\Delta T < 2^{\circ}\text{C}$), positivas ou negativas, que geram baixas vazões, ocorrem em 31% das horas do ano entre 8 e 18h. Por outro lado, há horas com alta diferença de temperatura entre a camada externa e o ar da atmosfera ($\Delta T > 10^{\circ}\text{C}$), correspondentes a apenas 7% das horas do ano. Em aproximadamente 60% dos dados, o intervalo da diferença de temperatura está compreendido entre 2 a 10°C .

A Figura 29a apresenta as vazões encontradas para o ano completo, conforme as estações. A Figura 29b apresenta um gráfico *box plot* para esses mesmos dados.

Para todas as horas do ano (de 8 às 18h), a grande maioria das vazões, cerca de 95%, está acima de $0,1\text{m}^3/\text{s}$. Para os períodos de verão e primavera, 67% a vazão está compreendida entre 0,1 e $0,3\text{m}^3/\text{s}$ enquanto, para as estações de inverno e outono, cerca de 54% desses valores estão entre 0,2 e $0,5\text{m}^3/\text{s}$. A partir de análise visual, é possível perceber que as maiores vazões de ar encontram-se no período mais frio, inverno e outono. Enquanto nas estações de verão e primavera, esses valores são mais baixos.

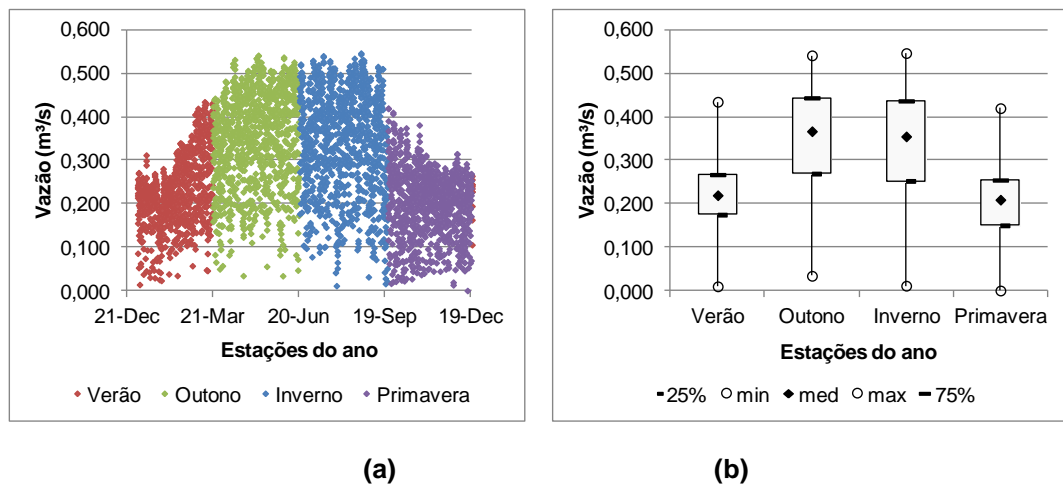


Figura 29 - Vazão calculada para cada estação do ano em (a) gráfico de dispersão e (b) *Box Plot*.

Foi feita também uma análise estatística desses dados de vazão em função da estação do ano, conforme Figura 29b. As mínimas encontradas são semelhantes e próximas de zero. Os valores máximos e medianos são semelhantes nas estações de outono e inverno e maiores que os casos de verão e primavera. As máximas chegam a $0,55\text{m}^3/\text{s}$ nos períodos mais frios e $0,43\text{m}^3/\text{s}$ nos períodos mais quentes.

O gráfico (Figura 29b) indica ainda que, nos meses mais quentes, os limites do intervalo de dados são mais próximos, concentrando 50% dos dados em intervalos com variação de até $0,09\text{m}^3/\text{s}$ ($0,17$ a $0,27\text{m}^3/\text{s}$) no verão e $0,10\text{m}^3/\text{s}$ ($0,151$ a $0,255\text{m}^3/\text{s}$) na primavera. Por outro lado, nos meses mais frios, os limites do intervalo de dados são menos concentrados e apresentam variação de $0,18\text{m}^3/\text{s}$ ($0,253$ a $0,436\text{m}^3/\text{s}$) no inverno e de $0,17\text{m}^3/\text{s}$ ($0,269$ a $0,443\text{m}^3/\text{s}$) no outono. Isso indica que a temperatura da camada externa da fachada varia mais nos meses mais frios.

A Figura 30 apresenta a incidência mensal de radiação na fachada norte em Viçosa para o período entre 8 e 18h. O gráfico indica que as maiores médias mensais ocorrem no período entre maio e agosto. Nos meses mais quentes, a radiação incidente na fachada norte varia de aproximadamente $70\text{W}/\text{m}^2$ e $150\text{W}/\text{m}^2$ porém, atingem um pico de $250\text{W}/\text{m}^2$ nos meses de maio e agosto.

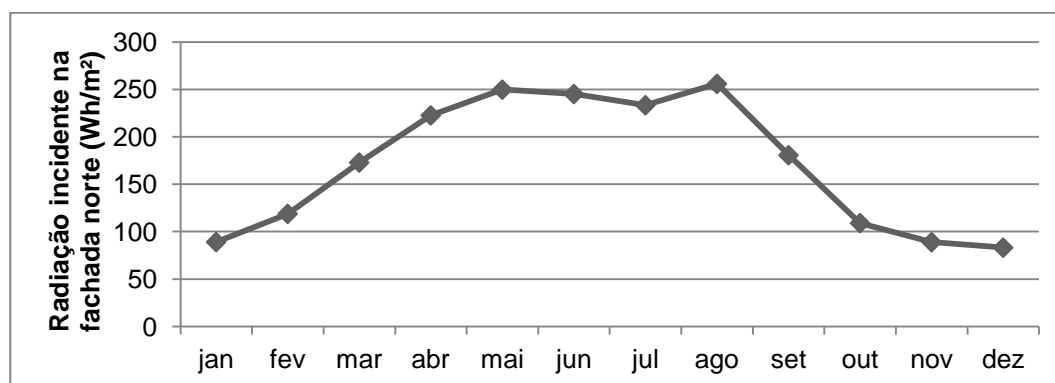


Figura 30 - Médias mensais dos totais diários da radiação incidente na fachada norte.

Uma possível explicação para esse comportamento é o fato de que o período mais quente do ano é também o mais chuvoso e em função disso há maior nebulosidade presente na atmosfera, o que limita a incidência de radiação solar nas faces do edifício. Assim, a temperatura da camada externa da fachada não difere tanto da temperatura do ar da atmosfera. Neste caso, estima-se que em condições climáticas com alta nebulosidade ou baixa incidência solar, a fachada dupla tende a provocar menos escoamento de ar no ambiente.

Para confirmar a relação da vazão de ar provocada pelo efeito chaminé da fachada dupla em relação à radiação incidente da fachada, foi gerado um gráfico (Figura 31) com o comportamento da vazão de ar ao longo do ano em Viçosa em relação à radiação incidente na face norte.

A incidência de radiação solar na fachada norte, no período de 8h às 18h para o ano completo, varia de 0 a aproximadamente $500\text{W}/\text{m}^2$. É possível

perceber que há uma tendência a uma relação direta entre a vazão de ar provocada pela fachada dupla e a radiação incidente nela. Nos momentos que ocorrem os valores máximos de radiação, a vazão correspondente no modelo é de aproximadamente $0,5\text{m}^3/\text{s}$.

Assim, é possível apontar a radiação incidente como uma responsável pela diferença de temperatura entre a camada externa da fachada e o ar externo. Essa diferença é que promove o aquecimento do ar da cavidade gerando escoamento de ar no ambiente.

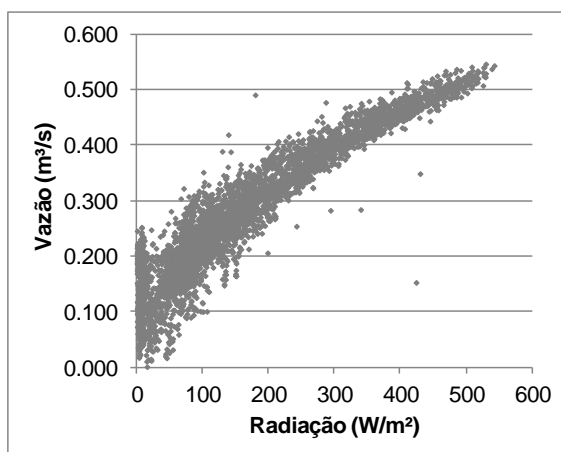


Figura 31 – Vazão de ar pelas aberturas do modelo em função da radiação incidente na fachada norte para o ano todo.

As taxa renovação de ar no modelo foram calculadas em função da vazão de ar pelas aberturas do ambiente e pela geometria do modelo. A Figura 32 mostra a frequência de ocorrência de intervalos de taxas de renovação de ar por hora para o ano completo de 8h às 18h.

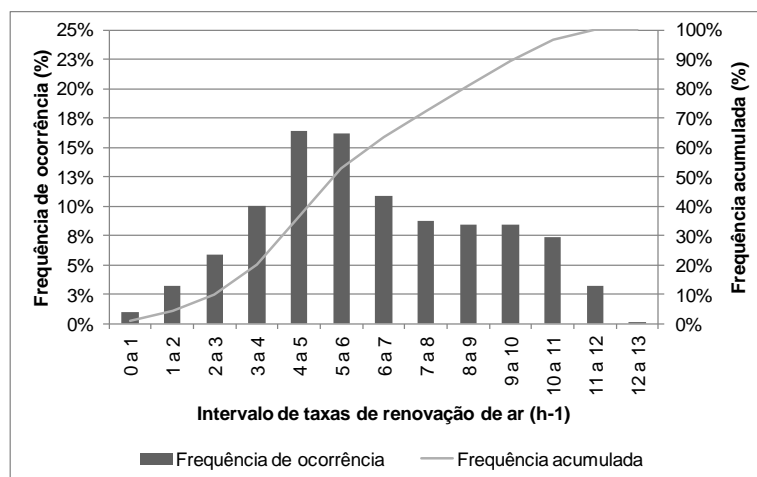


Figura 32 – Frequência de ocorrência de intervalos de taxa de renovação de ar no ambiente interno.

As condições climáticas de Viçosa permitem que, em 47% das horas do ano, a taxa de renovação de ar seja maior que 6 renovações por hora, estando de acordo com o mínimo recomendado por Macintyre (2008) para ambientes que comportam atividades como a de um escritório. Os valores máximos encontrados para taxa de renovação de ar chegam a 11 a 13 renovações por hora, mas em apenas 3% do ano.

4.2.4 Velocidade média do ar no ambiente em função de sua vazão nas aberturas

Até esta etapa do trabalho, o potencial de ventilação no modelo foi apresentado em função da vazão de ar pelas aberturas. Porém, o programa CFD também permite que a velocidade média do ar no ambiente interno seja extraída dos modelos. A partir dessas variáveis foi possível fazer uma estimativa das velocidades médias do ar no ambiente interno, traçando uma linha de tendência da velocidade média no ambiente em função da vazão nas aberturas (Figura 33). É importante ressaltar que essa relação vale especificamente para a geometria modelada neste trabalho.

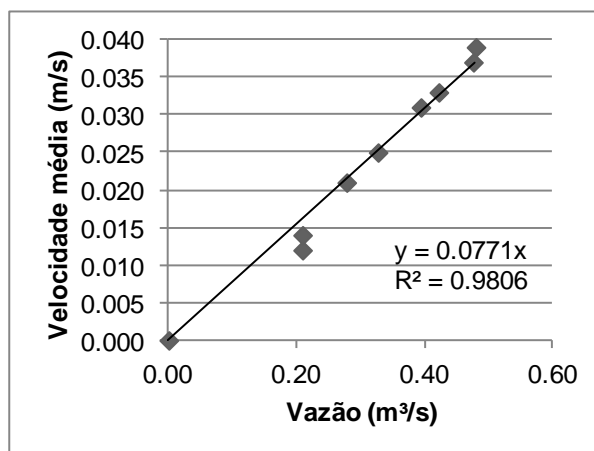


Figura 33 – Correlação da velocidade média do ar no ambiente interno com a vazão de ar pelas aberturas.

Sabendo que as vazões encontradas para o ano todo estão abaixo do limite de 0,6 m³/s, tem-se que a velocidade média do ar no ambiente provocada pelo efeito da chaminé térmica da fachada dupla está no limite de 0,046 m/s, aproximadamente. A Tabela 11 mostra alguns valores de vazão e velocidade média correspondente.

Tabela 11 – Valores de vazão e velocidade média do ar no ambiente interno.

Vazão (m ³ /s)	Velocidade média (m/s)
0,1	0,008
0,2	0,015
0,3	0,023
0,4	0,031
0,5	0,039
0,6	0,046

O gráfico de zona de bem estar (seção 2.4.1 - Velocidade do ar X Temperatura do ar) foi usado para avaliar se as velocidades do ar encontradas neste modelo, durante todo o ano, estão proporcionando condições de bem estar ao ambiente. Os valores mais altos encontrados nos períodos de inverno e outono estão na ordem de 0,04m/s. Nas estações de verão e primavera os máximos são da ordem de 0,025m/s. Para esses valores de velocidade, o gráfico de Roedler (1957, citado por Macintyre, 2008) sugere que a temperatura do ar deve estar entre 18 e 23°C aproximadamente, conforme apresentado na Figura 34. Porém, sabe-se que há neste clima, valores de temperatura mais altos, principalmente na estação de verão.

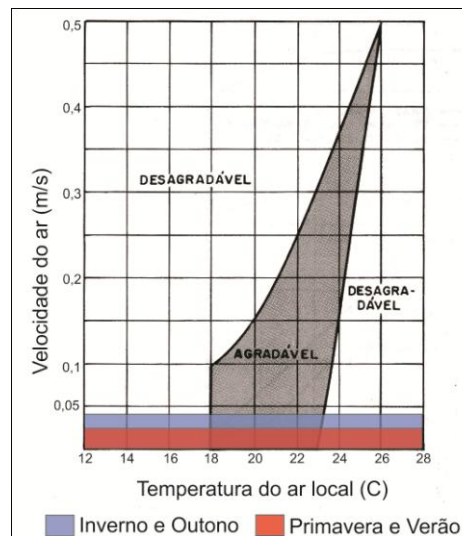


Figura 34 - Velocidade do ar encontrada para os períodos de outono e inverno e primavera e verão.

Assim, é possível inferir que nos períodos mais frios, quando ocorrem baixas temperaturas (até 23°C aproximadamente), a velocidade do ar provocada pelo efeito da chaminé térmica da fachada dupla pode ser suficiente para promover condições agradáveis aos usuários. Já nos períodos mais quentes do

ano, a velocidade do ar requerida para proporcionar um ambiente agradável é maior, o que não se conseguiu com o modelo testado.

É preciso considerar que a velocidade extraída do programa é uma média de todos os pontos do ambiente e que as configurações simuladas possuem valores exatos de temperaturas. Nos casos mais próximos da realidade, os valores de temperatura do ar do ambiente interno e do ar externo não são iguais. Assim, é possível que modelos que consideram situações reais, tenham uma distribuição de ar mais variada, com velocidades que alteram a média.

4.2.5 Necessidade de ventilação segundo a Carta Psicrométrica de Givoni e os valores encontrados para o ambiente com fachada dupla

O teste seguinte relaciona os momentos do dia em que, pela carta psicrométrica apresentada na seção 2.4.1 (Velocidade do ar X Temperatura do ar), a ventilação pode melhorar a sensação térmica. A carta indica que, para as condições em que a temperatura do ar está acima de 29°C e/ou a umidade relativa presente no ar está acima de 80%, a ventilação pode ser uma estratégia eficiente na melhoria da sensação térmica. Tendo em vista as limitações do modelo, optou-se por restringir o valor mínimo de temperatura do ar, passando-o para 27°C. A Figura 35 apresenta as vazões encontradas para os casos em que foi determinada a necessidade de ventilação.

A análise do gráfico nos permite afirmar que 50% das vazões encontradas para estes momentos concentram-se entre 0,2 e 0,37. Apesar de, nos momentos em que a ventilação é necessária haver baixas vazões, apenas em 5% do total desses momentos, elas estão abaixo de 0,1m³/s. A vazão máxima chegou a 0,55 m³/s, sendo 54% dos valores de vazões maiores que 0,25 m³/s. Nos momentos em que a ventilação é necessária para melhorar as condições térmicas de um ambiente no clima de Viçosa, a fachada dupla pode funcionar como uma estratégia para promover ventilação em condições de calmaria.

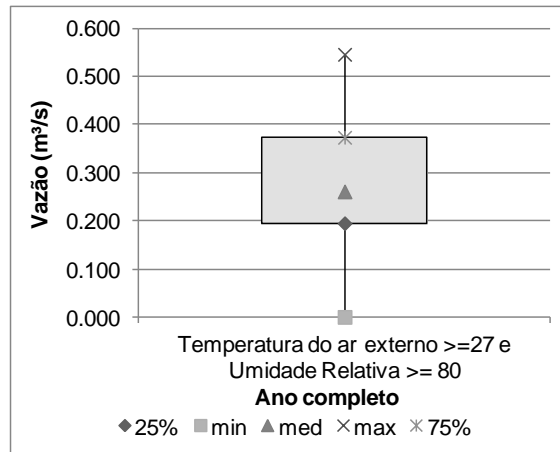


Figura 35 – Gráfico *box plot* com vazões para os momentos do ano em que a temperatura do ar externo é maior que 27°C e/ou a umidade relativa do ar é maior que 80%.

4.3 Resultados para diferentes pavimentos

As simulações feitas para os três pavimentos possuem a mesma diferença de temperatura entre a camada externa da fachada e o ar da atmosfera ($\Delta T = 5^\circ\text{C}$). Assim, os diferentes resultados encontrados nas vazões nestes casos estão relacionados somente à altura da cavidade. A Figura 36 apresenta os resultados de vazões encontrados para as aberturas, em cada pavimento. Nestas simulações, apenas o pavimento analisado possui aberturas nas faces norte e sul, os demais pavimentos permanecem fechados.

A vazão aumentou 2,2 vezes mais na simulação do pavimento 4, para a simulação do 3, e 2,8 vezes mais do pavimento 4 para o 2. Essas simulações nos mostram que a ventilação em um ambiente com fachada dupla está relacionada à altura da cavidade, o que também pode ser confirmado pela Equação 01 (seção 3.2.3) que identifica a vazão de ar provocada pelo efeito chaminé. Quanto maior a distância que o ar percorre para sair da cavidade, maior será a vazão no ambiente. Assim, os pavimentos superiores do edifício terão menor taxa de ventilação, pois a altura que o ar vai percorrer (altura da cavidade) é menor. Portanto, pode-se presumir que os pavimentos mais altos vão apresentar maiores temperaturas no ambiente, devido às menores taxa de ventilação.

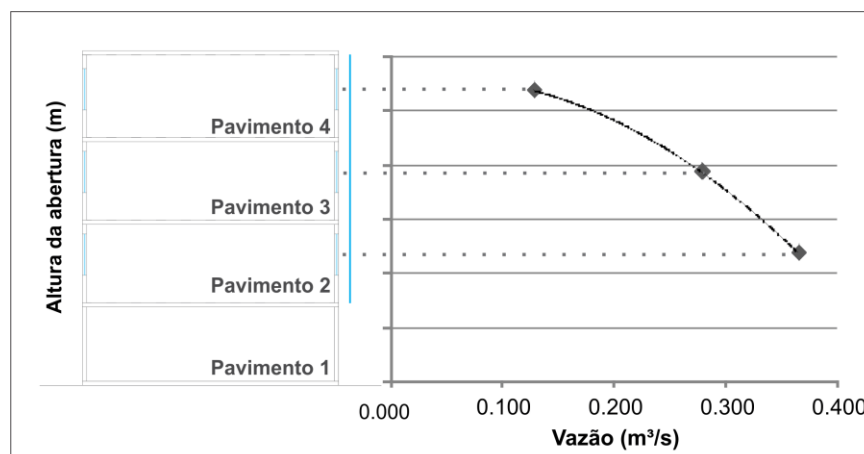


Figura 36 – Vazões obtidas para cada pavimento.

No entanto, sabe-se que em alguns momentos do dia é possível que a camada externa da fachada esteja a uma temperatura abaixo da temperatura do ar da atmosfera. Neste caso, o ar da cavidade está mais denso e tende a descer. Essa situação faz com que os pavimentos superiores tenham maiores taxas de ventilação, invertendo a situação.

4.4 Análise dos casos de inverno e verão para o clima tropical de altitude

É improvável que, em uma situação real na arquitetura, a temperatura do ambiente externo ou interno, ou ainda as temperaturas das superfícies e do ar sejam perfeitamente exatas, como os modelos anteriores. Assim, os resultados obtidos com os modelos determinados na seção 3.4 (Definição de casos representativos das condições climáticas do clima tropical de altitude) tendem a ser mais próximos da realidade.

Os modelos representativos de inverno e verão foram simulados com malhas definidas na seção 4.1 (Testes de validação do modelo CFD) e geraram dados numéricos e imagens das condições de ventilação e temperatura no ambiente. As avaliações levaram em consideração o diagrama recomendado por Roedler, conforme descrito na seção 2.4.1 (Velocidade do ar X Temperatura do ar).

Conforme detalhado na seção 3.4 (Definição de casos representativos das condições climáticas do clima tropical de altitude), a frequência de ocorrência das temperaturas do vidro da camada externa da fachada para inverno e verão foram usadas para determinar as condições de contorno usadas nas simulações. O anexo 1 apresenta os dados de frequência de ocorrência e

frequência acumulada das temperaturas superficiais da camada externa da fachada e a Figura 37 apresenta a frequência de ocorrência das temperaturas da camada externa da fachada para inverno e verão.

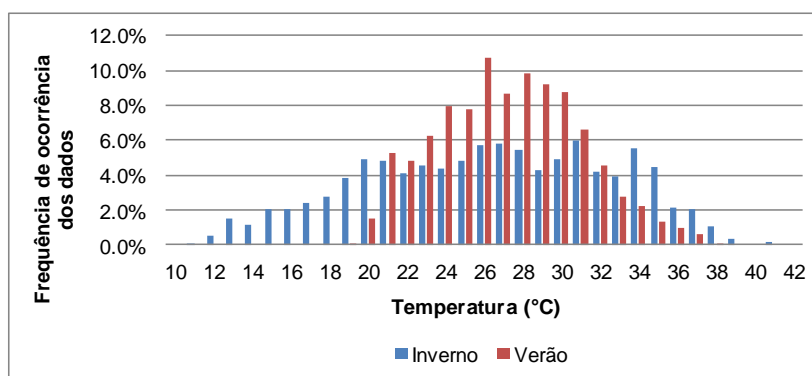


Figura 37 - Gráfico com frequência de ocorrência das temperaturas da camada externa da fachada dupla para os períodos de inverno e verão.

É importante lembrar que o período de verão possui alta taxa de nebulosidade, além de elevada altura solar, o que limita a incidência solar na fachada e conseqüentemente, o aumento da temperatura do vidro, deixando-o com temperatura mais próxima do ar externo. Por outro lado, no inverno, a baixa altura solar e a baixa nebulosidade justificam o aumento da temperatura da camada externa em valores superiores ao período de verão.

A Tabela 12 apresenta os valores das condições de contorno usadas nas simulações. O anexo 2 apresenta os dados de temperaturas superficiais das superfícies da cavidade, do ambiente e temperaturas iniciais do ar do ambiente e externa para os extremos máximos e mínimos de inverno e verão que foram usados para a determinação dos valores para condições de contorno para os modelos.

Tabela 12 – Valores usados como condições de contorno: casos extremos.

Período	Extremo	Temperatura (°C)				
		Camada externa	Superfícies_Cavidade	Superfícies_Ambiente interno	Inicial do ar do ambiente	Inicial do ar da atmosfera
Verão	Mín.	22,5	23,9	23,7	23,7	22,7
	Máx.	34,5	34,3	26,2	26,6	27,6
Inverno	Mín.	16,5	17,0	18,3	18,4	15,0
	Máx.	36,5	34,5	22,5	23,0	26,0

4.4.1 Inverno

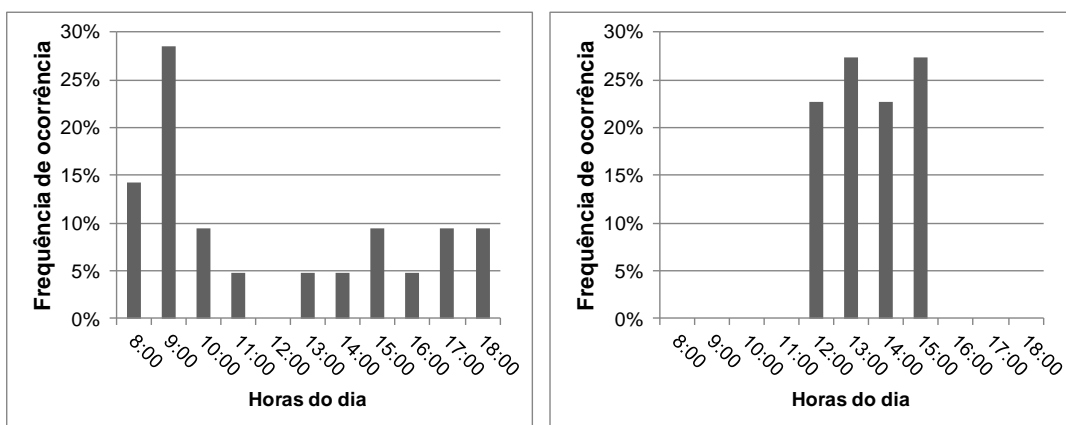
No período de inverno, os valores encontrados para temperatura superficial da camada externa da fachada dupla estão compreendidos entre 11 a

41°C, sendo que cerca de 90% das temperaturas superficiais da camada externa da fachada estão entre 16 e 36°C.

No modelo que representa o caso extremo mínimo de inverno, a temperatura da superfície da camada externa da fachada está aproximadamente 2°C abaixo da temperatura do ar do ambiente interno e 1,5°C acima da temperatura inicial do ar da atmosfera. No modelo simulado como caso extremo máximo, a temperatura da camada externa da fachada está 13,5°C acima da temperatura do ar interno e 10,5°C acima da temperatura do ar do exterior.

As condições climáticas identificadas como extrema mínima de inverno levaram em consideração os casos em que a camada externa da fachada dupla possui temperaturas entre 16 e 16,9°C. Esses valores ocorrem ao longo de todo o dia no período de inverno, sendo que cerca de 62% deles ocorrem no início da manhã (8 e 9h) e no final da tarde (17 e 18h). Estes são os horários do dia em que a quantidade de radiação solar incidente na fachada é menor e, portanto, a temperatura da camada externa da fachada dupla tende a ficar mais próxima da temperatura do ar externo.

Para o caso representativo do modelo extremo máximo de inverno, foram determinados os casos em que a camada externa da fachada possui temperaturas de 36 a 36,9°C. Estes momentos ocorrem entre 12 e 15h, que é o período mais quente do dia. A Figura 38 apresenta a frequência de ocorrência dos momentos do dia em que ocorrem as condições extremas mínimas (a) e máximas (b) de inverno. O anexo 3 contém as data e as hora de ocorrência das temperaturas da camada externa extremas mínimas e máximas de inverno e verão.



(a)

(b)

Figura 38 – Frequência de ocorrência dos momentos do dia que ocorrem as temperaturas extremas (a) mínimas e (b) máximas de inverno.

A trajetória do ar nos modelos foi diferente das encontradas para os casos simulados com a análise de sensibilidade apresentado em 4.2.1 (Trajetória e velocidade do ar nos modelos), conforme mostra a Figura 39.

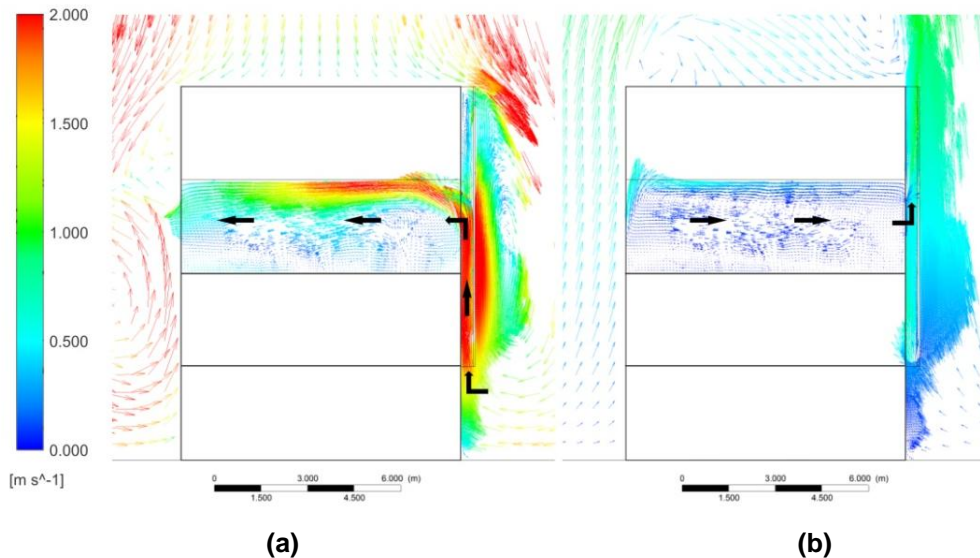


Figura 39 – Vetores de velocidade em corte para visualização da trajetória do ar nos modelos extremos de inverno: (a) mínimo e (b) máximo.

No modelo que representa o extremo mínimo de inverno (Figura 39a), a temperatura do ar no interior do ambiente era, inicialmente, maior que a temperatura da atmosfera e da camada externa da fachada. O ar presente no ambiente, menos denso, deslocou-se para a abertura sul, pois a cavidade presente na abertura norte funcionou como uma barreira para a saída do ar, dificultando sua passagem. Assim, o ar encontrou maior facilidade de escoamento no sentido da maior abertura.

No caso extremo máximo (Figura 39b), a temperatura da camada externa está mais alta que a temperatura do ar do ambiente e do ar externo. Neste caso, o comportamento do ar foi próximo ao encontrado nos modelos 6 a 9 da Tabela 4 da seção 3.3 (Análise de sensibilidade da variável 'Temperatura da camada externa da fachada'). O ar presente na cavidade foi aquecido pela alta temperatura da camada externa da fachada (em relação às demais) tornando-se menos denso. O escoamento de ar da cavidade se deu no sentido de subida, sugando o ar presente no ambiente.

A Figura 40 apresenta um gráfico dos contornos de velocidade e temperatura nos instantes finais de simulação em um plano horizontal situado a 1,2m do piso, para o caso extremo mínimo de inverno. O valor encontrado para

temperatura do ar interno no momento final é de aproximadamente 16°C, 2,4°C abaixo do instante inicial, o que pode ser explicado pela entrada de ar externo a uma temperatura mais baixa (15°C) que o ar do ambiente. A Figura 40a que apresenta a velocidade do ar no plano, possui uma distribuição de velocidade desuniforme variando entre valores próximos de 0m/s até cerca de 0,4m/s.

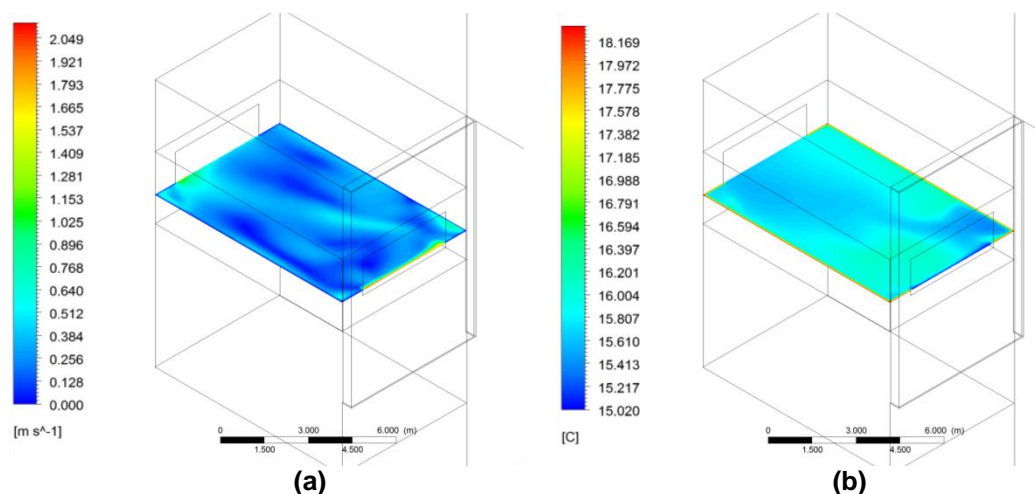


Figura 40 – Contornos de (a) velocidade e (b) de temperatura para um plano horizontal para o caso extremo mínimo de inverno.

Para o modelo que representa o caso extremo máximo de inverno, a velocidade no plano horizontal localizado a 1,2m do piso, possui uma distribuição uniforme, com velocidades de cerca de 0,07m/s para o ar do ambiente interno (Figura 41a). Os contornos de temperatura apresentados para o instante final da simulação (Figura 41b) indicam que o ar chega a aproximadamente 24°C, 2°C acima da temperatura inicial.

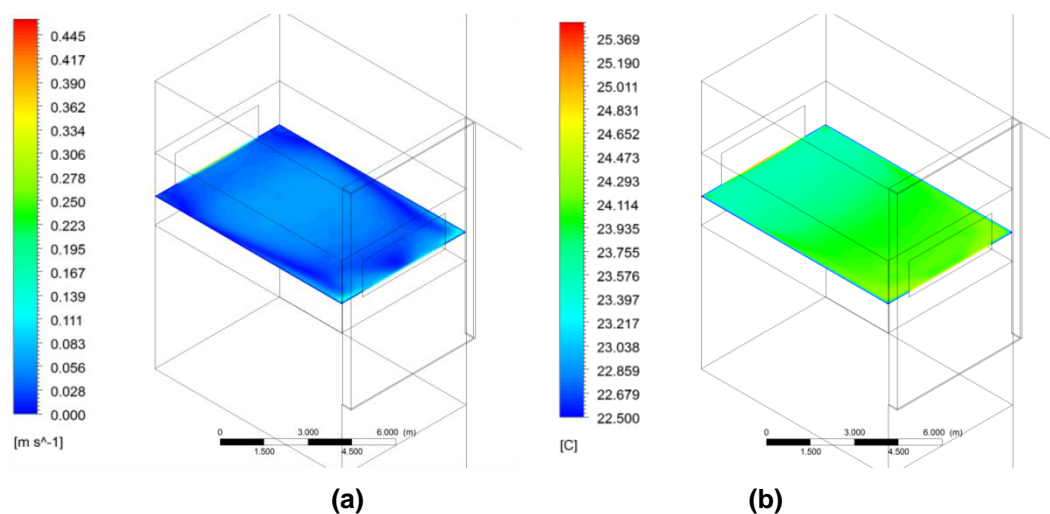


Figura 41 – Contornos de (a) velocidade e (b) de temperatura para um plano horizontal para o caso extremo máximo de inverno.

Para verificar se os casos simulados enquadram-se em uma situação de conforto, foram plotados no gráfico de Zona de bem estar de Roedler (Figura 42) os valores de velocidade e temperatura do ar correspondentes aos casos extremos mínimo e máximo de inverno.

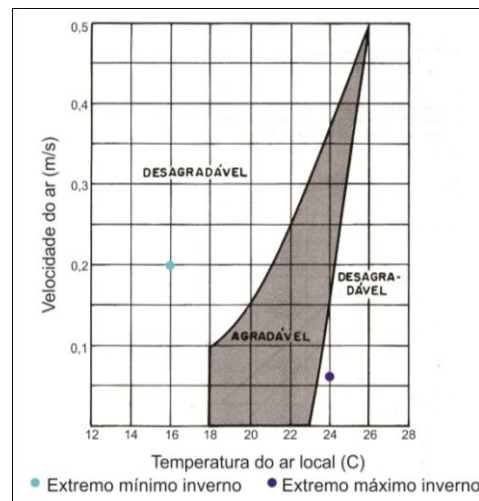


Figura 42 - Plotagem de velocidade e temperatura para os casos de inverno no gráfico de Roedler.

Tanto o caso extremo mínimo, quanto o caso extremo máximo estão fora da zona de conforto estabelecida por Roedler. O caso extremo mínimo tinha a temperatura inicial do ar a 18,4°C configurada em uma situação próxima ao limite de desconforto por frio. Neste caso, a estratégia mais adequada seria diminuir a quantidade de ventilação neste ambiente, com o fechamento das aberturas, deixando apenas a infiltração adequada para renovação do ar. Dessa forma, a temperatura do ar teria se mantido próxima ao valor inicial, com ventilação adequada.

O modelo que representa o caso extremo máximo de inverno finalizou a simulação com a temperatura do ar a 24°C. O gráfico indica que esta temperatura requer ventilação mínima de 0,15m/s, cerca de 0,1m/s maior que a obtida. Assim, o uso de uma estratégia para elevar a ventilação provocada pela fachada dupla pode ser suficiente para enquadrar o caso em uma situação de conforto.

Há chances de que a fachada dupla seja suficiente para provocar condições adequadas de conforto para este clima no inverno. Destaca-se a importância do controle do usuário sobre a quantidade de ventilação no ambiente. Nos períodos iniciais da manhã e nos finais de tardes a ventilação necessária será mais baixa que nos outros momentos do dia.

A Tabela 13 mostra os resultados de vazão de ar pelas aberturas e as taxas de renovação de ar no ambiente, obtidos a partir das simulações para os casos de inverno.

Tabela 13 - Resultados numéricos obtidos pela simulação para os casos extremos mínimo e máximo de inverno.

Período	Vazão na abertura/janela (m ³ /s)	Taxa de renovação de ar (renov./hora)	Taxa de renovação de ar (m ³ /hora)
Extremo mín. de inverno	4,76	105,8	17.136,0
Extremo máx. de inverno	0,46	10,1	1.641,6

O caso extremo mínimo de inverno apresentou alta vazão de ar nas aberturas em comparação ao caso extremo máximo. Em relação à taxa de renovação de ar, o caso extremo máximo possui o limite mínimo recomendado por Macintyre (2008) para um ambiente que funcione como sala de aula, por exemplo. Para a geometria simulada, considerando a ocupação de 40 pessoas, a taxa de renovação ar recomendada pelo Ministério da Saúde deveria ser de no mínimo 1080m³/hora. Tanto o caso extremo mínimo quanto o caso extremo máximo enquadram-se nessa recomendação.

4.4.2 Verão

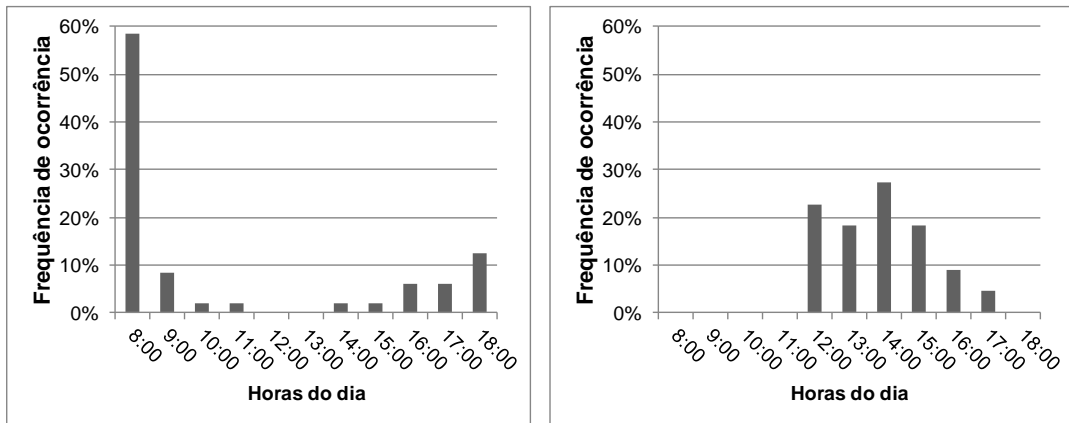
Para o período de verão, o intervalo correspondente aos valores encontrados para a temperatura superficial da camada externa da fachada varia de 19 a 38°C, sendo 90% dos valores encontrados para temperatura superficial da camada externa da fachada dupla, compreendidos entre 22 e 34°C.

No modelo simulado para o caso extremo mínimo, a temperatura do ar da atmosfera está próxima da temperatura superficial da camada externa da fachada e apenas 1°C abaixo da temperatura do ar do ambiente interno. O modelo que representa o extremo máximo de verão possui a temperatura da atmosfera cerca de 7°C abaixo da temperatura da camada externa da fachada.

Para os modelos representativos dos casos extremos mínimo e máximo de verão, foram escolhidos os momentos em que em que a camada externa da fachada dupla possui temperaturas entre 22 e 22,9°C e 34 e 34,9 °C, respectivamente.

Dos momentos em que ocorrem os valores extremos mínimos, cerca de 70% são no início da manhã (8h) ou no fim da tarde (18h). Da mesma forma que nos casos extremos mínimos de inverno, nos casos de verão, a fachada recebe

menor quantidade de radiação solar nestes momentos. Para os instantes que ocorrem casos extremos máximos de verão, 86% acontecem entre 12 e 15h. A Figura 43 apresenta a frequência de ocorrência dos momentos do dia em que ocorrem as condições extremas mínimas (a) e máximas (b) de verão.

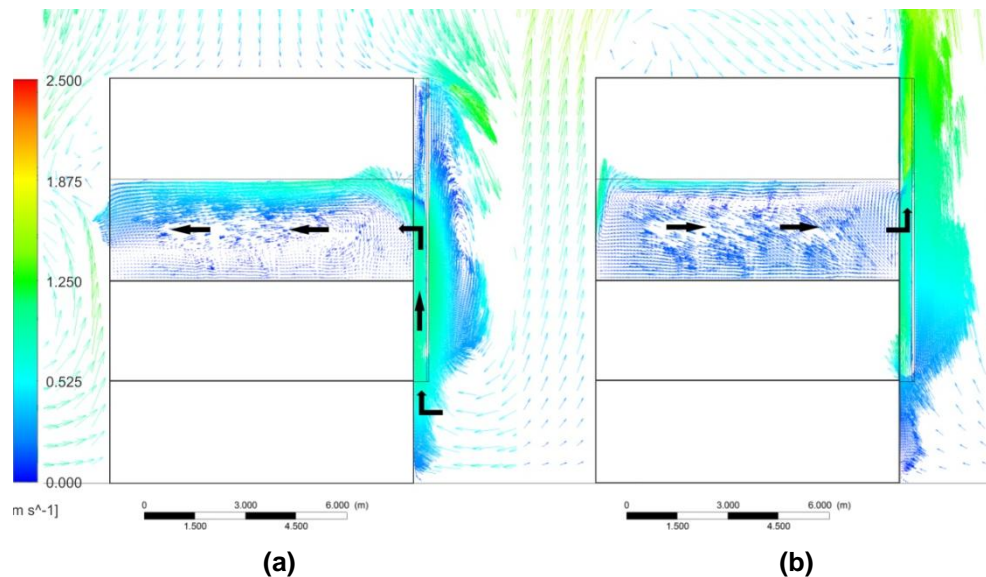


(a)

(b)

Figura 43 – Frequência de ocorrência dos momentos do dia que ocorrem as temperaturas extremas (a) mínimas e (b) máximas de verão.

A trajetória do ar nos modelos extremos de verão está apresentada na Figura 44.



(a)

(b)

Figura 44 - Vetores de velocidade em corte para visualização da trajetória do ar nos modelos extremos de inverno: (a) mínimo e (b) máximo.

Da mesma forma que o caso extremo mínimo de inverno, o caso mínimo de verão, possui a temperatura do ambiente interno mais alta que a temperatura da camada externa da fachada e que a temperatura do ar exterior. A trajetória do

ar seguiu a mesma tendência do caso anterior: a maior abertura na face sul facilitou o escoamento do ar, enquanto a cavidade funcionou como obstáculo.

Para o caso extremo máximo de verão, como a temperatura da camada externa da fachada é mais alta que as demais, o ar seguiu a mesma trajetória dos casos simulados com essa configuração. O ar presente na cavidade saiu pelo topo da fachada e o ar no ambiente tendeu a ocupar esse espaço, entrando pela face sul.

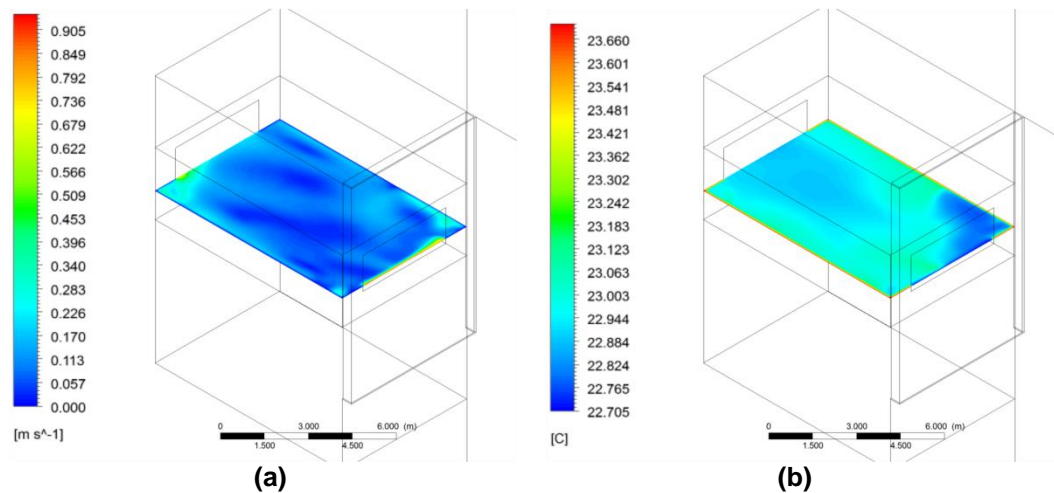


Figura 45 - Contornos de (a) velocidade e (b) de temperatura para um plano horizontal para o caso extremo mínimo de verão.

Para o caso extremo mínimo de verão, a temperatura do ar local, que inicialmente era de 23,7°C abaixou para aproximadamente 23°C no instante final, conforme mostrado na Figura 45b. A velocidade do ar encontrada para um plano na mesma altura é de cerca de 0,1m/s (Figura 45a).

Os resultados da simulação do caso extremo máximo de verão indicam que a velocidade do ar no ambiente no instante final varia de 0 m/s a 0,17m/s no centro do ambiente, para um plano horizontal situado a 1,2m do piso (Figura 46a). Neste mesmo plano, a temperatura é de cerca de 27°C, conforme mostrado na Figura 46b.

Da mesma forma que para o período de inverno, os valores extraídos para temperatura e velocidade média do ar para os casos de verão, foram também plotados no gráfico de Roedler (Figura 47).

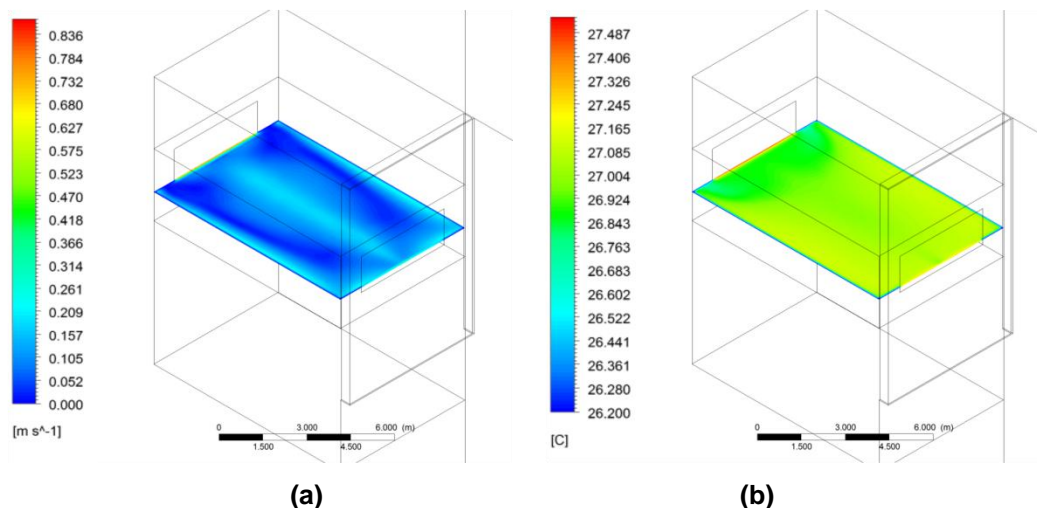


Figura 46 - Contornos de (a) velocidade e (b) de temperatura para um plano horizontal para o caso extremo máximo de verão.

O caso extremo mínimo de verão está localizado dentro da área estabelecida como condições agradáveis de conforto térmico. Isso indica que nos momentos do dia em que a radiação incidente está mais baixa, a fachada dupla pode ser suficiente para assegurar condições de ventilação adequada ao ambiente.

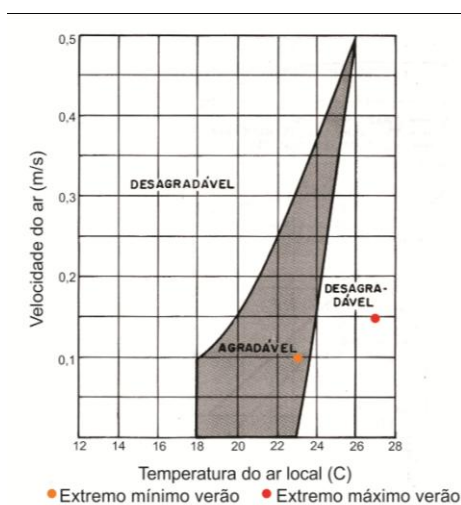


Figura 47 – Plotagem de velocidade e temperatura para os casos de verão no gráfico de Roedler.

Porém, o caso extremo máximo está fora da área de conforto devido à alta temperatura do ar no ambiente interno, neste momento. O ar que entra no ambiente (vindo da atmosfera) possui temperatura elevada. Neste caso, a fachada dupla, que é um sistema passivo que utiliza das condições climáticas

externas, não é suficiente para promover conforto térmico devido à alta temperatura do ar externo.

A Tabela 14 mostra os resultados de vazão de ar pelas aberturas e taxa de renovação de ar no ambiente para os casos extremos mínimo e máximo de verão.

Tabela 14 - Resultados numéricos obtidos pela simulação para o caso extremo máximo de verão.

Período	Vazão na abertura/janela (m³/s)	Taxa de renovação de ar (renov./h)	Taxa de renovação de ar (m³/hora)
Extremo mín. de verão	2,12	47,1	7.632,0
Extremo máx. de verão	0,762	16,9	2.743,2

Nos modelos que representam os casos extremos de verão, os valores de taxa de renovação de ar encontrados estão acima das recomendações mínimas estabelecidas por Macintyre (2008), para um ambiente que funcione como auditório, bem como, pela recomendação do Ministério da Saúde, quando a ocupação for de 40 pessoas.

Os casos extremos mínimos tanto do inverno, quanto do verão apresentaram vazões de ar pelas aberturas extremamente altas, mesmo com a diferença de temperatura entre a camada externa da fachada e o ar externo sendo baixa. Além disso, a trajetória do ar nestes casos foi diferente das observadas nos casos anteriores. É possível que as temperaturas das superfícies do ambiente exerceram influência no efeito da chaminé térmica e conseqüentemente, na trajetória e velocidade do ar, o que não foi investigado neste trabalho.

5 CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta as conclusões obtidas com o trabalho baseadas nas discussões dos resultados, as limitações observadas e especula sugestões para trabalhos futuros.

5.1 Reflexões

O trabalho foi desenvolvido com o objetivo de investigar como a fachada dupla influencia na ventilação de um ambiente no clima tropical de altitude. A análise do potencial de ventilação da fachada dupla para este clima foi desenvolvida por meio de simulações computacionais que utilizaram os programas EnergyPlus (simulação termo-energético) e Ansys CFX (dinâmica de fluidos computacional).

Verificou-se que a fachada dupla pode ser benéfica para o ambiente construído, confirmando seu potencial para gerar ventilação natural em edificações no clima tropical de altitude, embora o modelo avaliado não tenha atendido, em relação ao conforto térmico, as condições extremas de verão.

O clima tropical de altitude possui heterogeneidade de tempo ao longo do ano, com os períodos quente e frio marcantes. A alta umidade local no período de verão limita a incidência da radiação solar na fachada nesta estação. Como a ventilação natural no modelo foi maior nos períodos em que há maior luminosidade no céu, que são os momentos mais frios, conclui-se que o escoamento de ar provocado pela fachada dupla está mais relacionado à abundância da incidência de radiação solar local do que à temperatura da atmosfera. Nas regiões em que há considerável incidência de radiação solar, mesmo sendo mais frias, há chances de que a implantação da fachada dupla seja uma estratégia capaz de promover ventilação adequada às edificações.

Melhores resultados poderão ser obtidos por meio de estudos sobre a influência dos parâmetros arquitetônicos dessa tipologia de fachada. A redução ou aumento no fluxo de ar proporcionado por diferenças nos elementos da fachada, como dimensionamentos das aberturas, largura da cavidade, uso de outros materiais devem ser considerados em sua implantação de forma a explorar ao máximo o potencial da fachada dupla para promover adequada ventilação nos espaços projetados.

A concepção e implantação de fachadas duplas deverão considerar outros aspectos não tratados neste estudo, tais como a incidência de radiação

solar no ambiente, bem como aspectos relacionados à estanqueidade, acústica e manutenção.

5.2 Resumo de resultados

- A fachada dupla testada possui maior potencial de ventilação nos períodos mais frios do ano. A nebulosidade presente nos dias de verão e primavera provoca redução da incidência de radiação na fachada, mantendo a temperatura do ar da cavidade próxima a do ar externo.
- A vazão proporcionada pelas aberturas permitiu que em quase 50% do ano (no horário de 8 às 18h), a renovação do ar necessária para a manutenção de uma boa qualidade do ar ambiente de interiores fosse maior que 6 trocas/hora, que é um padrão mínimo para ambientes que comportam atividades como a de um escritório.
- Os modelos que simularam a contribuição de ventilação da fachada dupla para diferentes pavimentos revelaram que, quando a incidência solar é capaz de elevar a temperatura do ar da cavidade a temperaturas mais altas que o ar externo, há maior ventilação nos pavimentos mais baixos. Os resultados confirmam que a distância percorrida pelo ar que se desloca pelo efeito da chaminé térmica está relacionada à vazão obtida no ambiente. Dessa forma, prolongar a altura da cavidade no último pavimento pode ser uma estratégia para aumentar o potencial da ventilação para todos os pavimentos.
- A configuração de fachada dupla testada neste trabalho é capaz de promover ventilação em 95% das horas diurnas do ano em que há necessidade de ventilação (temperaturas são maiores que 27°C e/ou a umidade relativa do ar está acima de 80%).
- Para os modelos que foram simulados com condições de contorno extraídas do programa EnergyPlus para o período de inverno: no caso em que em que a incidência solar na fachada não é suficiente para elevar a temperatura do ar da cavidade consideravelmente acima do ar externo, a temperatura do ar externo é baixa e, não há necessidade de ventilação para resfriamento do ar. Para o modelo que representa os momentos mais quentes do dia, observa-se necessidade de mais ventilação no ambiente para proporcionar conforto térmico. É possível que outras

configurações de fachada dupla sejam capazes de promover a ventilação adequada para estes momentos.

- Para os modelos que foram simulados com condições de contorno extraídas do programa EnergyPlus para o período de verão: o caso que representa os momentos do início da manhã (8h) ou do fim da tarde (18h) se enquadrou, ao final da simulação, em uma faixa de conforto térmico agradável, considerando a temperatura e velocidade do ar local. Porém, nos períodos mais quentes do dia, a temperatura inicial do ar da atmosfera é elevada. Como o sistema apresentado neste trabalho utiliza o ar da atmosfera para ventilar o ambiente, em momentos cuja temperatura do ar da atmosfera for elevada, o sistema não será capaz de manter o ambiente em conforto térmico.

5.3 Contribuições da pesquisa

Diante da dificuldade de encontrar trabalhos e exemplos na arquitetura brasileira relacionados com fachadas duplas, esta pesquisa abre possibilidades e cria incentivos para outras avaliações sobre o tema. O conhecimento mais aprofundado das propriedades das fachadas duplas ajudará nas diretrizes para se projetar em países de clima quente. Diante dessa e de outras avaliações será possível propor adaptações cada vez mais adequadas para projeto dessa tipologia de fachada para países de clima tropical.

Os testes realizados a partir do procedimento que avaliou a vazão de ar pelas aberturas de acordo com a diferença de temperatura entre a camada externa da fachada dupla e o ar externo permitem análises de outros climas. Este método não limita a avaliação da ventilação pela fachada dupla ao clima tropical de altitude.

A apresentação do método de simulação computacional da fachada dupla nos dois programas utilizados permitiu uma análise das condições de ventilação no modelo com fachada dupla, tendo em vista a diferença de tempo de simulação em cada um dos programas.

5.4 Limitações do trabalho

As principais limitações do desenvolvimento desta pesquisa estão relacionadas à falta de medições em um modelo experimental, em escala 1:1. Os resultados obtidos com as simulações mostram coerências com a realidade, mas casos reais poderiam conferir um maior grau de confiabilidade.

Além disso, destaca-se a integração de dois programas. Esse procedimento gera incertezas e possíveis limitações nos resultados das simulações em função dessa associação. O estudo de fachadas duplas em um programa que integre análise térmica com o efeito da ventilação poderá permitir uma análise mais completa das consequências do fenômeno no ambiente.

Além disso, o modelo estudado não representa um caso real. Há outras influências que podem modificar os valores encontrados para ventilação, como a falta de equipamentos, iluminação e usuários.

5.5 Indicações para trabalhos futuros

No desenvolvimento desta pesquisa observaram-se outras linhas de pesquisa que podem ser exploradas para uma maior compreensão das adaptações necessárias para a implementação de fachadas dupla para climas quentes, por meio de simulações computacionais. Abaixo, estão listadas algumas sugestões de trabalhos que podem colaborar com o desenvolvimento do conhecimento científico nesta área:

- Buscar um software que integre a análise térmica e de ventilação em fachadas dupla em uma mesma ferramenta.
- Fazer simulações de análise de sensibilidade de outras variáveis como temperatura das paredes do ambiente, do ar exterior, do ar interno, dentre outras.
- Simular outros modelos ou tipologias, considerando a inserção de outros parâmetros arquitetônicos como a variação de larguras da cavidade, variação no dimensionamento das aberturas do ambiente interno, fechamento da base da cavidade da fachada dupla, mudança de materiais, dentre outros.
- Simulação de tipologias de fachadas duplas para outras condições climáticas e com efeito do vento local.
- Utilizar condições de contorno de fluxo de calor (W/m^2) ao invés de temperatura para as superfícies.
- Investigar a influência que as temperaturas superficiais do ambiente (paredes) têm no efeito da ventilação.

Este trabalho responde ao objetivo geral da investigação, verificando que a fachada dupla é capaz de promover ventilação em uma edificação localizada no clima tropical de altitude. Os objetivos específicos foram atendidos, dando subsídios para o desenvolvimento do método proposto. Espera-se que o trabalho contribua com outras investigações para o desenvolvimento de diretrizes que possam indicar os ajustes necessários à implantação da fachada dupla em regiões de clima quente.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALWAER, H.; CROOME, D.J. Clemments. Key performance indicators (KPIs) and priority setting in using the multi-attribute approach for assessing sustainable intelligent buildings. In: **Building and Environment**. Oxford: Elsevier, 2010. v. 45, pp. 799–807.

ASHARE. **ASHARE Handbook – Fundamentals**. Atlanta, 2005. Cap. 27.

BALDINELLI, G. Double skin facades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system. In: **Building and Environment**. Oxford: Elsevier, 2009. v. 44, pp. 1107–1118.

BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 3523, 28 ago 1998. Diário Oficial da União, Brasília, 31/08/1998. Seção 1;40-42. Disponível em: http://www.saude.mg.gov.br/atos_normativos/legislacao-sanitaria/estabelecimentos-de-saude/qualidade-do-ar-interior/PORTARIA_3523.pdf. Acesso em: 10 de dezembro de 2011.

BOAKE, Terri Meyer; ARCH, B.; ARCH, M. HARRISON, Kate. CHATHAM, Andrew. **The Tectonics of the Double Skin**: Green Building or Just more Hi-Tech Hi-Jinx?. University of Waterloo: The Tectonics of the Double Skin: North American Case Studies. 2001.

BODART, Magali; GRATIA, Elizabeth. Bibliography study of control strategies in buildings equipped with ventilated double skin facades. Universidade Católica de Louvain, 2003. Disponível em: <http://www.bbri.be/activefacades/new/download/Bibliography%20study%20of%20control%20strategies%20in%20buildings%20equipped%20with%20VDSF.df>. Acesso em: 20 de abril de 2011.

CRAWLEY, Drury B.; LAWRIE, Linda K.; PEDERSEN, Curtis O.; WINKELMANN, Frederick C.; WITTE, Michael J.; STRAND, Richard K.; LIESEN, Richard J.; BUHL, Walter F.; HUANG, Yu Joe; HENNINGER, Robert H.; GLAZER, Jason; FISHER, Daniel E.; SHIREY, Don B.; III, GRIFFITH, Brent T.; ELLIS, Peter G.; GU, Lixing. EnergyPlus: an update. **Proceedings...** SimBuild 2004, IBPSA-USA National Conference, Boulder, 2004.

CROOME, Derek Clemments. Building environment, architecture and people. In: _____ (Org.). **Intelligent Buildings**: Design, Management and operation. Cornwall: MGP Books Lta, 2004. cap.3, p.53-100.

DING, Wenting; HASEMI, Yuji; YAMADA, Tokiyoshi. Natural ventilation performance of a double-skin facade with a solar chimney. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2005. v.37, pp. 411–418.

EICKER, U.; FUX, V.; BAUER, U.; MEI, L.; INFIELD, D. Facades and summer performance of buildings. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2008. v.40, pp. 600–611.

GILDER, J; CROMME, Clements D.J.. Bio inspired Intelligent Design for the Future of Buildings. **Proceedings...**W098 & W111 - Special Track 18th CIB World Building Congress. Salford, United Kingdom, 2010.

GIVONI, Baruch. Comfort climate analysis and building design guidelines. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 1992. v. 18, pp. 11–23.

GRATIA, Elisabeth; HERDE, André de. Natural ventilation in a double-skin facade. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2004. v. 36, pp. 137–146.

_____. The most efficient position of shading devices in a double-skin facade. In: **Energy and Building**. Oxford: Elsevier, 2007. v. 39, pp. 364–373.

GUIMARÃES, Ítalo Bruno Baleeiro; CARLO, Joyce Correna. Caracterização bioclimática da cidade de viçosa-MG. In: ENCAC 2011. **Anais...** Búzios, 2011.

HAMZA, Neveen. Double versus single skin facades in hot arid areas. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2008. v. 40, pp. 240–248.

HAN, H.J; JEON, Y.I; LIM, S.H; KIM, W.W; CHEN, K. New developments in illumination, heating and cooling technologies for energy-efficient buildings. In: **Energy**. Oxford: Elsevier, 2010. v.35, pp. 2647–2653.

HARRISON, K.; MEYER-BOAKE, T. **The Tectonics of the Environmental Skin. University of Waterloo, School of Architecture**. 2003. Disponível em: http://www.fes.uwaterloo.ca/architecture/faculty_projects/terri/ds/double.pdf
Acesso em: 25 de março de 2011.

HENSEN, Jan L. M. LAMBERTS, Roberto. Introduction to building performance simulation. In: _____ (Org.). **Building performance simulation for design and operation**. New York: Spon Press, 2011. cap.1, p.1-14.

HENSEN, Jan L.M. On building performance simulation in a Changing environment. **Proceedings...** Seminário Building Performance Simulation for Design and Operation, Brasil, 2008. Disponível em: http://www.bwk.tue.nl/bps/hensen/publications/07_kgh_hensen_english.pdf
Acesso em 24 de março de 2011.

HIEN, Wong Nyuk; LIPING, Wang; CHANDRA, Aida Noplie; PANDEY, Anupama Rana; XIAOLIN, Wei. Effects of double glazed facade on energy consumption, thermal comfort and condensation for a typical office building in Singapore. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2005. v.37, pp. 563–572.

HILMARSSON, Jón Gunnar. Double skin facade Evaluating the Viability of the Component. Copenhagen Technical Academy Construction Architect, International Line, 2008. Disponível em: http://www.siteas.dk/systemImage/double_skin_facade.pdf. Acesso em: 20 de março de 2011.

JIRU, Teshome Edae.; TAO, Yong-X.; HAGHIGHAT, Fariborz. Airflow and heat transfer in double skin facades. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2011. v.43, pp. 2760–2766.

KAKLAUSKAS, Arturas; ZAVADSKAS, Edmundas Kazimieras; NAIMAVICIENĖ, Jurga; KRUTINIS, Mindaugas; PLAKYS, Vytautas; VENSKUS, Donatas. Model for a Complex Analysis of Intelligent Built Environment. In: **Automation in Construction**. Oxford: Elsevier, 2010. v.19, pp. 326–340.

KIM, Deuk-Woo; PARK, Cheol-Soo. Difficulties and limitations in performance simulation of a double skin facade with EnergyPlus. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2011. v.43, pp. 3635-3645.

LEE, Eleanor; SELKOWITZ, Stephen; BAZJANAC, Vladimir; INKAROJRIT, Vorapat; KOHLER, Christian. Belgian Building Research Institute. Department of Building Physics, Indoor Climate & Building Services. 49 f. 2004.

LONCOUR, X.; DENEYER, A.; BLASCO, M.; FLAMANT, G.; WOUTERS, P. **Ventilated double facades – Classification & illustration of facade concepts**. Belgian Building Research Institute, 2004. Disponível em: <http://www.bbri.be/activefacades/new/download/Ventilated%20Doubles%20Facades%20-%20Classification%20&%20illustrations.dvf2%20-%20final.pdf>. Acesso em 24 de março de 2011.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Ventilação industrial e controle da poluição**. Rio de Janeiro: LTC, 2008.

MANZ, H.; FRANK, Th. Thermal simulation of buildings with double-skin facades. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2005. v.37, pp. 1114–1121.

MARCONDES, Mônica Pereira. **Soluções projetuais de fachadas para edifícios de escritórios com ventilação natural em São Paulo**. 244p. Tese (Doutorado Arquitetura e Urbanismo) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

MONNA, S; MASERA, G. Intelligent Tall Building Envelope Technologies and Design Alternatives for Comfort and Energy Efficiency in Hot, Arid Climate. In: CIB 2010 World Congress **Proceedings...** Salford Quays: 2010 11p.

NETO, Ronaldo Horácio Cumplido; TIBIRIÇÁ, Álvaro Messias Bigonha; TIBIRIÇÁ, Antônio Cleber Gonçalves; CAMPOS, Júlio César Costa. Um roteiro para simulação CFD de ventilação natural por ação dos ventos em edificações. In: ENCAC 2011. **Anais...** Búzios, 2011.

NIKOLAOU, T.; KOLOKOTSA, D.; STAVRAKAKIS, G. **Introduction to Intelligent Buildings. A handbook for Intelligent Buildings**. 2004. Disponível em: <http://www.ibuilding.gr/handbook/handbook.pdf>. Acesso em: 14 dezembro 2010.

OCHOA, Carlos Ernesto; CAPELUTO, Isaac Guedi. Advice tool for early design stages of intelligent facades based on energy and visual comfort approach. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2009. v. 41, pp. 480–488.

_____. Intelligent facades in hot climates: energy and comfort strategies for successful application. In: PLEA 2008 – 25th Conference on Passive and Low Energy Architecture. **Proceedings...** Dublin: 2008a 6p.

_____. Strategic decision-making for intelligent buildings: Comparative impact of passive design strategies and active features in a hot climate. In: **Building and Environment**. Oxford: Elsevier, 2008b. v. 43, pp. 1829–1839.

OLIVEIRA, Inês Moresco Danni; MENDONÇA, Francisco. **Climatologia - Noções Básicas e Climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Texto, 2007. 206 p.

ORDENES, Martín. PEDRINI, Aldomar. GHISI, Enedir. LAMBERTS, Roberto. Metodologia utilizada na elaboração da biblioteca de materiais e componentes construtivos brasileiros para simulações no visualdoe-3.1. Florianópolis, 2003. Disponível em: http://www.labeeee.ufsc.br/sites/default/files/publicacoes/relatorios_pesquisa/RP_Biblioteca_Materiais_VisualDOE.pdf. Acesso em: 13 abril de 2011.

OESTERLE, E., LIEB, R-D., LUTZ, M., & HEUSLER, W. **Double Skin Facades – Integrated Planning**. Prestel Verlag: Munich, Alemanha, 2001.

PAPPAS, Alexandra; ZHAI, Zhiqiang. ENERGY SIMULATION OF A DOUBLE SKIN FACADE: A PROCESS USING CFD AND ENERGYPLUS. **Proceedings...** Second National IBPSA-USA Conference. Cambridge, 2006.

_____. Numerical investigation on thermal performance and correlations of double skin facade with buoyancy-driven airflow. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2008. v.40, pp. 466–475.

PEEL, M. C; FINLAYSON, B. L; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Koppen-Geiger climate classification. In: **Hydrology and Earth System Sciences**, 2007. V. 11. p. 1633-1644.

POIRAZIS, Harris. Double skin facades. A literature review. Report of IEA SHC Task 34 ECBCS Annex 43, 2006. Disponível em: http://www.ecbcs.org/docs/Annex_43_Task34-Double_Skin_Facades_A_Literature_Review.pdf Acesso em: 16 de março 2011.

_____. Double Skin Facades for Office Buildings. Literature Review, 2004. Disponível em: http://www.ebd.lth.se/fileadmin/energi_byggnadsdesign/images/Publikationer/Bok-EBD-R3-G5_alt_2_Harris.pdf Acesso em: 16 de março de 2011.

RAMOS, Greici; GHISI, Enedir. Avaliação do cálculo da iluminação natural realizada pelo programa EnergyPlus. In: **Ambiente Construído**, 2010. v. 10, n. 2, pp. 159-169.

RODRIGUES, Jackson Martins; RODRIGUES, Rafael de Ávila; JUSTINO, Flávio Barbosa; COSTA, Luiz Cláudio; AMORIM, Marcelo Cid de. Efeitos locais e de larga escala na dinâmica climática do município de Viçosa – Minas Gerais. In: **Sociedade & Natureza**, 2010. v. 22, pp. 593-610.

ROSS, Jurandyr L. Sanches (Org.). **Geografia do Brasil**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005.

SAELEN, Dirk; ROELS, Staf; HENS, Hugo. Strategies to improve the energy performance of multiple-skin facades. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2008. v.43, pp. 638–650.

SCIGLIANO, Sérgio; HOLLO, Vilson. **Índice de ventilação natural**. São Paulo: PINI, 2001.

SREBRIC, Jelena. Ventilation performance prediction. In: HENSEN, Jan L. M.; LAMBERTS, Roberto (Org.). **Building performance simulation for design and operation**. New York: Spon Press, 2011. cap.6, p.143-179.

STREICHER, Wolfgang (Org). BESTFACADE: Best Practices for Double Skin Facades. WP1 Report: State of the Art, 2005.

TIBÚRCIO, T.M.S. **The impact of high-tech learning environments on pupils' interactions**. PhD Thesis. The University of Reading, Reading. UK, 2007.

TORRES, Mauricio; ALAVEDRA, Pere; GUZMÁN, Amado; CUERVA, Eva; PLANAS, Carla; CLEMENTE, Raquel; ESCALONA, Vanessa. Double skin facades – cavity and exterior openings dimensions for saving energy on mediterranean climate. **Proceedings...** Building Simulation. 2007. pp. 198 – 205.

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

UUTTU, Sini. Study of Current Structures in Double-Skin Facades. 101 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Estrutural e física do edifício) - Helsinki University of Technology (HUT), Finland. 2001.

VERSAGE, Rogério de Souza. **Ventilação natural e desempenho térmico de edifícios verticais multifamiliares em campo grande, MS**. 96 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC. 2009.

ZHOU, Juan; CHEN, Youming. A review on applying ventilated double-skin facade to buildings in hot-summer and cold-winter zone in China. In: **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Oxford: Elsevier, 2010. v.14, pp. 1321–1328.

WIGGINTON, Michael; HARRIS, Jude. **Intelligent skins**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002. 184p. Architectural Press.

WONG, J.K.W.; LI, H.; WANG, S.W. Intelligent building research: a review. In: **Automation in Construction**. Oxford: Elsevier, 2005. v.14, pp. 143–159.

WONG, P.C.; PRASAD, D.; BEHNIA, M. A new type of double-skin facade configuration for the hot and humid climate. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2008. v.40, pp. 1941–1945.

YAGOUB, W; APPLETON, S; STEVENS, W. Case study of double skin facade in hot climates. **Proceedings...** Conference: Adapting to Change: New Thinking on Comfort Cumberland Lodge, Londres: 2010.

ANEXOS

Anexo 1 – Frequência de ocorrência das temperaturas superficiais da camada externa da fachada dupla inverno e verão.

Inverno

Temperatura sup. camada externa (°C)	Número de vezes que ocorre	Frequência	Frequência acumulada
11 a 11,9	1	0,10%	0,10%
12 a 12,9	5	0,48%	0,58%
13 a 13,9	16	1,55%	2,13%
14 a 14,9	12	1,16%	3,29%
15 a 15,9	21	2,03%	5,32%
16 a 16,9	21	2,03%	7,35%
17 a 17,9	25	2,42%	9,77%
18 a 18,9	29	2,80%	12,57%
19 a 19,9	40	3,87%	16,44%
20 a 20,9	51	4,93%	21,37%
21 a 21,9	50	4,84%	26,21%
22 a 22,9	42	4,06%	30,27%
23 a 23,9	47	4,55%	34,82%
24 a 24,9	45	4,35%	39,17%
25 a 25,9	50	4,84%	44,00%
26 a 26,9	59	5,71%	49,71%
27 a 27,9	60	5,80%	55,51%
28 a 28,9	56	5,42%	60,93%
29 a 29,9	44	4,26%	65,18%
30 a 30,9	51	4,93%	70,12%
31 a 31,9	62	6,00%	76,11%
32 a 32,9	43	4,16%	80,27%
33 a 33,9	41	3,97%	84,24%
34 a 34,9	57	5,51%	89,75%
35 a 35,9	46	4,45%	94,20%
36 a 36,9	22	2,13%	96,32%
37 a 37,9	21	2,03%	98,36%
38 a 38,9	11	1,06%	99,42%
39 a 39,9	4	0,39%	99,81%
40 a 40,9	0	0,00%	99,81%
41 a 41,9	2	0,19%	100,00%

Verão

Temperatura sup. camada externa (°C)	Número de vezes que ocorre	Frequência	Frequência acumulada
18 a 18,9	0	0,00%	0,00%
19 a 19,9	1	0,10%	0,10%
20 a 20,9	15	1,52%	1,62%
21 a 21,9	52	5,25%	6,87%
22 a 22,9	48	4,85%	11,72%
23 a 23,9	62	6,26%	17,98%
24 a 24,9	79	7,98%	25,96%
25 a 25,9	77	7,78%	33,74%
26 a 26,9	106	1,71%	44,44%
27 a 27,9	86	8,69%	53,13%

28 a 28,9	97	9,80%	62,93%
29 a 29,9	91	9,19%	72,12%
30 a 30,9	87	8,79%	80,91%
31 a 31,9	65	6,57%	87,47%
32 a 32,9	45	4,55%	92,02%
33 a 33,9	27	2,73%	94,75%
34 a 34,9	22	2,22%	96,97%
35 a 35,9	13	1,31%	98,28%
36 a 36,9	10	1,01%	99,29%
37 a 37,9	6	0,61%	99,90%
38 a 38,9	1	0,10%	100,00%

ANEXO 2 – Dados temperaturas superficiais das superfícies da cavidade, do ambiente e temperaturas iniciais do ar do ambiente e externa para os extremos máximos e mínimos de inverno e verão.

Extremo mínimo de inverno

Temperatura (°C)											
16,5°C	Superfícies da cavidade			Superfícies do ambiente						Inicial do ar	
Camada externa	Face leste	Face oeste	Face sul	Parede norte	Parede leste	Parede sul	Parede oeste	Piso	Teto	Ambiente	Externo
16,08	16,65	15,55	15,95	15,50	17,41	13,59	17,41	17,43	17,28	16,66	11,45
16,12	16,02	16,03	17,70	17,89	18,20	16,60	18,20	18,16	18,15	17,92	16,78
16,13	16,46	16,34	16,60	16,48	18,10	15,04	18,10	18,08	18,00	17,54	13,69
16,20	16,26	16,15	18,60	19,11	21,17	17,53	21,17	21,17	21,04	20,46	13,64
16,35	16,43	16,43	17,41	17,43	18,34	16,07	18,34	18,32	18,26	17,94	15,45
16,37	15,94	16,03	20,63	20,55	17,95	17,10	17,95	18,04	18,02	17,76	16,60
16,38	16,06	16,07	20,09	20,59	20,76	18,59	20,76	20,69	20,72	20,33	15,29
16,38	16,19	16,20	19,84	20,17	20,78	17,80	20,78	20,77	20,72	20,25	14,18
16,39	16,90	16,29	15,49	15,06	16,50	13,86	16,50	16,49	16,40	15,96	13,96
16,41	18,17	16,32	15,93	15,56	17,55	13,83	17,55	17,54	17,40	16,81	12,30
16,49	16,31	16,30	18,93	19,62	21,22	18,53	21,22	21,20	21,12	20,67	15,90
16,56	16,53	16,54	17,83	17,89	18,24	16,51	18,24	18,21	18,19	17,95	16,75
16,60	17,07	16,37	15,85	15,51	17,38	13,91	17,38	17,42	17,26	16,74	20,15
16,63	16,65	16,65	17,83	17,82	18,27	16,40	18,27	18,25	18,22	17,96	16,31
16,70	16,51	16,50	18,92	19,59	21,10	18,68	21,10	21,03	20,99	20,58	16,69
16,73	16,81	16,82	17,72	17,65	18,31	16,25	18,31	18,29	18,25	17,96	15,85
16,82	16,79	16,77	19,45	19,66	21,01	17,69	21,01	21,01	20,92	20,40	13,90
16,84	17,10	16,38	17,27	17,29	19,18	15,51	19,18	19,20	19,04	18,51	14,90
16,86	17,52	16,22	16,46	15,72	17,52	13,40	17,52	17,54	17,36	16,69	11,75
16,89	16,96	16,90	19,16	19,39	21,09	17,61	21,09	21,09	20,98	20,44	13,90
16,92	16,45	16,53	21,39	21,13	17,47	16,96	17,47	17,59	17,59	17,57	15,96
Média	16,65	16,35	18,05	18,07	18,93	16,26	18,93	18,92	18,85	18,43	15,01
Média das médias	17,0			18,3						18,43	15,01

Extremo máximo de inverno

Temperatura (°C)											
36,5°C	Superfícies da cavidade			Superfícies do ambiente						Inicial do ar	
Camada externa	Face leste	Face oeste	Face sul	Parede norte	Parede leste	Parede sul	Parede oeste	Piso	Teto	Ambiente	Externo
36,00	35,07	36,75	34,36	29,03	20,60	20,92	20,60	21,01	20,94	22,78	27,00
36,05	34,07	35,32	33,32	27,49	19,93	19,55	19,93	20,26	20,17	21,75	25,08
36,09	33,35	33,14	29,84	24,37	19,95	19,67	19,95	20,06	20,10	21,69	26,44
36,11	34,38	35,90	34,40	28,85	21,44	20,74	21,44	21,77	21,67	22,79	24,38
36,24	32,58	32,31	32,09	26,06	20,77	19,10	20,77	20,98	20,87	21,65	22,99
36,34	36,31	38,66	36,53	32,71	26,05	25,38	26,05	26,32	26,27	27,20	28,54
36,39	33,33	33,10	32,13	26,86	22,61	20,74	22,61	22,80	22,68	23,39	25,00
36,40	33,29	33,98	33,34	27,50	21,14	19,97	21,14	21,41	21,29	22,38	24,19
36,49	36,66	39,00	34,70	30,54	24,03	24,21	24,03	24,30	24,30	25,87	29,93
36,52	33,39	33,94	31,41	25,25	19,01	18,22	19,01	19,31	19,19	20,97	25,99
36,57	36,69	39,55	35,27	30,32	22,59	22,59	22,59	22,88	22,90	24,31	27,13
36,58	33,21	32,95	30,45	24,44	19,80	19,51	19,80	19,98	19,95	21,39	25,63
36,67	35,01	36,49	34,47	28,81	21,37	20,89	21,37	21,66	21,60	22,96	25,36
36,71	33,48	34,20	33,19	27,16	20,96	19,69	20,96	21,23	21,11	22,13	23,90
36,75	34,72	35,56	33,14	28,39	23,36	22,50	23,36	23,56	23,51	24,73	27,93
36,83	33,74	34,42	33,26	27,36	21,03	20,03	21,03	21,27	21,19	22,41	24,89
36,85	36,01	38,00	32,87	27,40	20,88	21,33	20,88	21,11	21,17	22,85	26,99
36,85	35,04	36,25	33,03	27,03	19,42	19,46	19,42	19,79	19,71	21,74	27,08
36,86	33,35	33,08	30,86	24,62	19,87	18,10	19,87	20,10	19,95	21,27	25,30
36,87	37,08	39,63	34,25	29,24	21,29	22,64	21,29	21,55	21,69	23,83	29,49
36,87	33,68	34,41	33,70	28,08	22,83	21,15	22,83	23,04	22,93	23,51	24,28
36,98	36,47	38,56	35,66	30,68	23,39	22,66	23,39	23,70	23,62	24,88	27,30
Média	34,59	35,69	33,29	27,83	21,47	20,87	21,47	21,73	21,67	23,02	26,13
Média acumulada	34,5			22,5						23,0	26,0

Extremo mínimo de verão

Temperatura (°C)											
22,5°C	Superfícies da cavidade			Superfícies do ambiente						Inicial do ar	
Camada externa	Face leste	Face oeste	Face sul	Parede norte	Parede leste	Parede sul	Parede oeste	Piso	Teto	Ambiente	Externo
22,01	21,99	22,00	24,20	23,85	22,61	22,08	22,62	22,53	22,66	22,36	27,18
22,01	27,56	23,26	22,74	22,98	24,60	21,86	24,60	24,58	24,49	24,08	20,86
22,01	28,73	22,08	22,13	22,30	24,33	20,95	24,36	24,27	24,21	23,71	19,69
22,04	27,78	22,85	22,65	22,73	24,42	21,41	24,42	24,42	24,31	23,86	23,00
22,06	28,05	22,09	21,74	21,57	22,71	20,76	22,76	22,67	22,66	22,37	21,14
22,06	28,02	22,05	22,00	22,09	23,88	20,84	23,92	23,82	23,79	23,33	20,76
22,09	28,65	22,09	21,79	21,77	23,41	20,70	23,46	23,36	23,33	22,93	19,69
22,09	21,66	25,08	25,50	25,46	23,65	23,93	23,57	23,45	23,71	23,32	23,86
22,14	28,37	23,63	22,24	22,30	23,88	21,20	23,89	23,86	23,78	23,39	21,81
22,15	26,86	23,25	22,37	22,46	23,95	21,46	23,96	23,93	23,85	23,49	18,08
22,16	27,96	22,25	21,29	21,04	22,15	20,26	22,20	22,11	22,11	21,84	21,16
22,19	25,59	22,30	22,63	22,75	24,37	21,64	24,38	24,34	24,27	23,87	20,85
22,22	21,70	22,22	27,15	27,33	24,96	24,54	24,96	24,95	25,08	24,38	25,79
22,27	23,93	22,65	21,77	21,30	22,10	20,29	22,11	22,06	22,05	21,74	23,16
22,28	22,75	22,51	23,36	23,04	23,87	21,47	23,87	23,85	23,81	23,45	23,15
22,28	28,26	23,18	22,27	22,26	24,04	20,88	24,04	24,04	23,92	23,46	20,70
22,31	22,78	22,59	22,59	22,04	22,34	20,45	22,34	22,30	22,31	21,80	24,44
22,36	21,97	21,97	25,99	26,27	24,88	24,50	24,88	24,74	24,94	24,56	22,93
22,38	21,97	21,97	27,26	27,35	25,18	24,98	25,18	25,15	25,29	24,67	31,08
22,39	28,11	23,23	22,52	22,47	24,03	21,20	24,03	24,01	23,92	23,50	20,41
22,40	29,42	22,52	21,88	21,88	23,63	20,75	23,66	23,62	23,54	23,12	23,95
22,46	23,22	22,59	22,98	22,98	23,96	22,14	23,96	23,86	23,89	23,59	20,75
22,48	26,40	22,39	23,05	23,38	25,14	22,39	25,20	25,05	25,04	24,63	20,53
22,49	26,86	22,57	22,65	22,66	24,01	21,75	24,02	23,98	23,93	23,59	20,78
22,51	24,95	22,66	22,71	22,74	24,21	21,69	24,22	24,14	24,12	23,74	20,24
22,53	22,59	23,30	24,45	24,04	22,68	21,71	22,68	22,59	22,74	22,41	27,40
22,53	24,64	22,98	21,49	20,80	21,34	19,88	21,36	21,29	21,32	21,05	21,71
22,54	24,12	22,74	22,63	22,58	23,83	21,68	23,84	23,77	23,75	23,42	23,60
22,56	22,36	22,48	25,65	25,51	24,09	23,52	24,09	23,98	24,15	23,81	26,01
22,62	22,45	22,78	24,91	24,78	23,22	23,17	23,22	23,10	23,30	23,27	21,45
22,63	25,12	22,77	22,92	22,95	24,38	21,88	24,39	24,33	24,29	23,92	20,34
22,64	24,64	23,03	23,24	23,34	24,65	22,41	24,65	24,60	24,57	24,21	21,31
22,66	24,71	23,10	21,69	21,01	21,55	20,17	21,57	21,51	21,53	21,27	22,64

22,69	28,88	23,65	23,08	23,15	24,94	21,71	24,94	24,94	24,83	24,35	20,20
22,71	22,66	23,28	26,51	26,94	26,57	24,23	26,57	26,55	26,56	26,12	25,09
22,79	22,44	25,82	25,53	25,59	24,65	24,18	24,62	24,54	24,68	24,18	25,51
22,80	24,87	23,26	23,06	23,07	24,43	22,09	24,44	24,41	24,34	23,99	20,98
22,80	29,48	22,75	22,97	23,02	24,63	21,95	24,68	24,58	24,55	24,15	17,06
22,83	27,51	23,82	23,03	23,05	24,29	22,19	24,30	24,26	24,21	23,90	21,51
22,84	26,03	23,42	23,32	23,33	24,56	22,35	24,56	24,53	24,48	24,15	20,66
22,85	22,84	23,68	24,74	24,20	22,36	22,17	22,36	22,26	22,46	22,40	26,84
22,89	24,26	22,84	24,85	25,36	27,36	24,03	27,36	27,34	27,23	26,71	20,33
22,91	29,29	23,00	22,69	22,71	24,30	21,62	24,33	24,26	24,21	23,82	19,59
22,94	22,64	23,41	27,60	27,97	26,69	24,89	26,69	26,70	26,72	25,93	29,21
22,95	27,96	23,02	22,42	22,30	23,48	21,76	23,55	23,44	23,43	23,18	20,96
22,97	22,47	22,48	28,65	28,87	26,72	25,48	26,72	26,74	26,76	26,09	29,06
22,98	23,45	23,16	23,52	23,43	24,37	22,47	24,37	24,30	24,30	24,01	21,53
22,99	22,63	22,64	26,43	26,62	25,10	24,53	25,10	25,04	25,17	24,80	32,10
Média	25,24	22,90	23,60	23,58	24,09	22,17	24,10	24,06	24,05	23,67	22,73
Média acumulada	23,9			23,7						23,6	22,7

Extremo máximo de verão

Temperatura (°C)

34,5°C	Superfícies da cavidade			Superfícies do ambiente						Inicial do ar	
	Face leste	Face oeste	Face sul	Parede norte	Parede leste	Parede sul	Parede oeste	Piso	Teto	Ambiente	Externo
34,01	33,74	36,03	31,75	28,29	24,67	23,76	24,67	24,75	24,78	25,37	28,38
34,04	34,62	38,33	33,32	29,97	25,00	24,70	25,00	25,14	25,19	25,91	29,73
34,08	37,18	40,08	31,34	29,03	25,70	26,80	25,71	25,75	25,95	27,43	26,63
34,19	35,04	35,95	30,96	28,61	26,27	26,58	26,28	26,30	26,43	27,66	26,20
34,20	34,72	38,20	33,48	30,31	25,06	24,97	25,06	25,24	25,28	26,14	31,65
34,22	37,03	39,79	32,97	31,19	28,65	28,81	28,66	28,68	28,81	29,62	26,98
34,32	36,44	38,32	32,55	30,60	28,44	28,31	28,45	28,47	28,57	29,36	27,14
34,35	33,15	32,62	30,71	27,17	24,51	23,20	24,51	24,61	24,57	25,18	26,35
34,37	32,71	33,62	31,26	27,48	24,32	23,09	24,32	24,42	24,40	24,87	28,19
34,38	34,56	39,31	33,93	32,36	28,82	30,62	28,81	28,84	29,09	30,21	26,14
34,44	32,96	33,80	31,58	28,01	24,51	23,63	24,51	24,61	24,62	25,33	27,26
34,51	32,86	33,75	31,62	27,73	23,82	22,67	23,82	23,96	23,93	24,61	25,56
34,54	33,49	33,02	31,76	28,77	26,68	25,27	26,68	26,75	26,72	27,00	25,85

34,58	34,29	36,26	33,31	29,82	24,80	24,44	24,80	24,96	24,99	25,90	31,03
34,62	34,26	36,54	32,61	28,84	24,06	23,32	24,06	24,23	24,22	25,07	26,64
34,66	34,34	36,74	32,49	28,75	24,53	23,66	24,53	24,65	24,66	25,31	29,85
34,67	33,58	33,12	30,77	27,35	24,68	23,85	24,68	24,79	24,76	25,62	29,29
34,67	35,42	39,18	34,99	32,51	27,59	27,77	27,59	27,76	27,81	28,73	27,63
34,67	36,12	35,41	31,17	28,93	27,28	27,24	27,29	27,30	27,39	28,44	25,54
34,72	33,34	32,79	31,20	27,38	24,31	23,09	24,31	24,41	24,38	24,96	28,79
34,92	35,85	40,49	35,42	32,69	27,59	27,55	27,59	27,75	27,81	28,58	26,96
34,99	37,30	39,24	31,96	29,52	26,57	27,34	26,57	26,61	26,78	28,18	26,81
Média	34,68	36,48	32,33	29,33	25,81	25,49	25,81	25,91	25,96	26,79	27,66
Média acumulada	34,5			26,4						26,8	27,7

ANEXO 3 – Dados de data e hora de ocorrência das temperaturas da camada externa (extremas mínimas, máximas e medianas).

Extremo mínimo de inverno

Data	Hora	Temperatura da camada externa
julho	9:00:00	16,08
31 julho	17:00:00	16,12
6 setembro	10:00:00	16,13
5 setembro	9:00:00	16,20
31 julho	13:00:00	16,35
2 julho	18:00:00	16,37
30 julho	17:00:00	16,38
5 setembro	15:00:00	16,38
4 julho	9:00:00	16,39
2 agosto	8:00:00	16,41
2 setembro	8:00:00	16,49
31 julho	16:00:00	16,56
2 julho	9:00:00	16,60
31 julho	15:00:00	16,63
30 julho	8:00:00	16,70
31 julho	14:00:00	16,73
5 setembro	11:00:00	16,82
12 julho	9:00:00	16,84
19 julho	9:00:00	16,86
5 setembro	10:00:00	16,89
4 julho	18:00:00	16,92

Extremo máximo de inverno

Data	Hora	Temperatura da camada externa
27 julho	15:00:00	36,00
26 julho	14:00:00	36,05
3 setembro	12:00:00	36,09
19 agosto	14:00:00	36,11
25 agosto	12:00:00	36,24
17 setembro	15:00:00	36,34
29 agosto	12:00:00	36,39
19 agosto	13:00:00	36,40
15 setembro	15:00:00	36,49
24 julho	13:00:00	36,52
12 setembro	15:00:00	36,57
3 agosto	12:00:00	36,58
13 agosto	14:00:00	36,67
18 agosto	13:00:00	36,71
15 setembro	13:00:00	36,75
13 agosto	13:00:00	36,83
11 setembro	14:00:00	36,85
24 julho	14:00:00	36,85
28 julho	12:00:00	36,86
3 setembro	15:00:00	36,87
28 agosto	13:00:00	36,87
28 agosto	15:00:00	36,98

Extremo mínimo de verão

5 janeiro	14:00:00	22,01
28 fevereiro	8:00:00	22,01
21 janeiro	8:00:00	22,01
14 março	8:00:00	22,04
1 janeiro	8:00:00	22,06
18 janeiro	8:00:00	22,06
17 janeiro	8:00:00	22,09
8 janeiro	18:00:00	22,09
22 fevereiro	8:00:00	22,14
24 fevereiro	8:00:00	22,15
4 janeiro	8:00:00	22,16
2 fevereiro	8:00:00	22,19
18 fevereiro	18:00:00	22,22
3 janeiro	9:00:00	22,27
13 fevereiro	10:00:00	22,28
13 março	8:00:00	22,28
14 fevereiro	11:00:00	22,31
30 dezembro	18:00:00	22,36
2 fevereiro	16:00:00	22,38
19 março	8:00:00	22,39
6 fevereiro	8:00:00	22,40
27 dezembro	8:00:00	22,46
24 dezembro	8:00:00	22,48
7 fevereiro	8:00:00	22,49
31 janeiro	8:00:00	22,51
14 fevereiro	17:00:00	22,53
7 janeiro	9:00:00	22,53
4 fevereiro	8:00:00	22,54

31 dezembro	16:00:00	22,56
4 janeiro	18:00:00	22,62
9 fevereiro	8:00:00	22,63
10 fevereiro	8:00:00	22,64
6 janeiro	9:00:00	22,66
3 março	8:00:00	22,69
7 março	18:00:00	22,71
25 dezembro	17:00:00	22,79
27 fevereiro	8:00:00	22,80
20 janeiro	8:00:00	22,80
11 fevereiro	8:00:00	22,83
12 fevereiro	8:00:00	22,84
6 janeiro	17:00:00	22,85
28 janeiro	8:00:00	22,89
1 fevereiro	8:00:00	22,91
7 março	16:00:00	22,94
26 dezembro	8:00:00	22,95
7 março	15:00:00	22,97
28 dezembro	9:00:00	22,98
5 fevereiro	18:00:00	22,99

Extremo máximo de verão

Data	Hora	Temperatura da camada externa
10 março	14:00:00	34,01
11 março	15:00:00	34,04
24 janeiro	15:00:00	34,08
25 janeiro	13:00:00	34,19
13 março	15:00:00	34,20
27 janeiro	15:00:00	34,22
27 janeiro	14:00:00	34,32
2 março	12:00:00	34,35
12 março	13:00:00	34,37
26 janeiro	17:00:00	34,38
11 março	13:00:00	34,44
20 março	13:00:00	34,51
5 março	12:00:00	34,54
13 março	14:00:00	34,58
20 março	14:00:00	34,62
12 março	14:00:00	34,66
14 março	12:00:00	34,67
6 março	16:00:00	34,67
26 janeiro	12:00:00	34,67
13 março	12:00:00	34,72
5 março	16:00:00	34,92
25 janeiro	14:00:00	34,99