



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**



**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE FACHADAS DUPLAS NO DESEMPENHO
TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES**

Ouro Preto - MG

2017



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**



Leonardo Carvalho Oliveira de Souza

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE FACHADAS DUPLAS NO DESEMPENHO
TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, como parte integrante dos requisitos para obtenção de título de Mestre em Engenharia Civil; área de concentração: Construção Metálica; linha de pesquisa: Arquitetura e Ambiente Construído.

Orientador: Prof. Dr. Henor Artur de Souza

Ouro Preto - MG

2017

S729e Souza, Leonardo Carvalho Oliveira de .
Estudo da eficiência de fachadas duplas no desempenho térmico de
edificações [manuscrito] / Leonardo Carvalho Oliveira de Souza. - 2017.
90f.: il.: color; graf.; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Henor Artur de Souza.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de
Minas. Departamento de Engenharia Civil. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil.

Área de Concentração: Construção Metálica.

1. Fachadas. 2. Calor - Convecção. 3. Ar -- Escoamento. I. Souza, Henor
Artur de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 624.014

**ESTUDO DA EFICIÊNCIA DE FACHADAS DUPLAS NO DESEMPENHO
TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES**

AUTOR: LEONARDO CARVALHO OLIVEIRA DE SOUZA

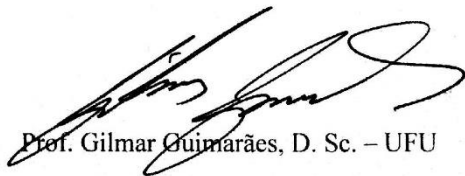
Esta dissertação foi apresentada em sessão pública e aprovada em 30 de março de 2017, pela Banca Examinadora composta pelos seguintes membros:



Prof. Henor Artur de Souza, D. Sc. – UFOP (Presidente)



Prof. Eliana Ferreira Rodrigues, D. Sc. – UFOP



Prof. Gilmar Guimarães, D. Sc. – UFU

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por permitir a realização dos meus sonhos.

À minha família por todo apoio.

À Renata por todo estímulo e consideração.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Henor Artur de Souza por toda dedicação, paciência, incentivo e amizade.

À Prof. Dr^a. Eliana Ferreira Rodrigues e ao Prof. Dr. Gilmar Guimarães pela disponibilidade e contribuição.

Ao Chico pela ajuda na coleta dos dados.

Aos professores do PROPEC pela seriedade e ensinamentos.

A Universidade Federal de Ouro Preto e a CAPES pelo estímulo aos estudos.

RESUMO

Fachadas duplas consistem na construção de uma fachada externa à edificação de modo a formar uma camada de ar circulante e têm sido amplamente utilizadas em todo mundo contribuindo com o desempenho térmico do ambiente construído. Neste trabalho faz-se um estudo da eficiência de uma fachada dupla utilizando uma célula protótipo, com foco no fluxo de ar e na convecção de calor na cavidade formada pela fachada dupla. O estudo abrange medições *in loco* e simulação numérica. Para aquisição de dados, termopares de superfície do tipo K são instalados nas faces das paredes e anemômetros de fio quente posicionados de modo a se obter a velocidade do vento na abertura inferior e superior da cavidade. A cavidade formada pela fachada dupla, ou seja, a espessura da camada de ar entre a fachada externa e a parede externa tem seus valores variados em 20, 15 e 10 cm. Implementa-se por meio do software ANSYS CFX um modelo numérico para avaliar a convecção de calor na cavidade e o fluxo de ar. Os resultados obtidos mostram que a presença da fachada dupla contribui com a diminuição da temperatura no interior do ambiente e a espessura da cavidade exerce papel importante uma vez que faz variar a velocidade de entrada do vento e a troca de calor entre as faces das paredes. Observa-se que o valor máximo de espessura (20 cm) propicia uma maior diferença de temperatura entre as faces das paredes, porém tem a menor eficiência energética uma vez que o ar apresenta menor velocidade de entrada não conseguindo remover tanto calor das superfícies como nas configurações de 15 cm e 10 cm.

Palavras-chave: Fachadas duplas, Convecção de calor, Fluxo de ar, Análise experimental, Simulação numérica.

ABSTRACT

Double-skin façades or DSF's consist in the construction of an external façade to the building so as to form a layer of circulating air and have been widely used throughout the world contributing to the thermal performance of the built environment. In this work, a study of the efficiency of a double façade using a prototype cell, focusing on the airflow and the convection of heat in the cavity formed by the double façade, is carried out. The study covers measurements *in loco* and numerical simulation. For data acquisition, K-type surface thermocouples are installed on the wall faces and hot wire anemometers are positioned so as to obtain the air velocity in the lower and openings of the cavity. The cavity formed by the double façade, that is, the thickness of the air layer between the external façade and the external wall has its values varied by 20, 15 and 10 cm. ANSYS CFX software implements a numerical model to evaluate the convection of heat in the cavity and the airflow. The results show that the presence of the double façade contributes to a decrease of the temperature inside the environment and the thickness of the cavity plays an important role so that it varies the speed of wind in the entry and the heat exchange between the faces of the walls. It is observed that the maximum value of cavity depth (20cm) provides a greater temperature difference between the faces of the walls, however it has the least energy efficiency since the air presents a lower speed of entry, being unable to remove as much heat from the surfaces as in the configurations 15 cm and 10 cm.

Keywords: Double skin façades, Heat convection, Airflow, Experimental analysis, Numerical simulation.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1

Figura 1.1 - Vista externa do Commerzbank, Frankfurt. Fonte: COMMERZBANK..., 2016. 13

Figura 1.2 - Interior do Commerzbank, Frankfurt. Fonte: COMMERZBANK..., 2016..... 13

CAPÍTULO 2

Figura 2.1 - Zoneamento bioclimático Brasileiro. Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005)..... 17

Figura 2.2 - Fachadas Duplas (a) naturalmente ventiladas e (b) mecanicamente ventiladas.
Fonte: SAELENS, 2002 20

Figura 2.3 - Corte transversal de uma fachada dupla com o esquema da transferência de calor e do fluxo de ar
Fonte: HØSEGGEN; WHACHENFELDT; HANSSSEN, 2008..... 21

Figura 2.4 - Classificação das fachadas duplas: a) Box window, b) Shaft-box, c) Corridor, d) Multi-storey. Fonte OESTERLE et al; 2001 21

Figura 2.5 - Tipos de origem do fluxo de ar: a) alimentação, b) remoção, c) cortina de ar externa d) cortina de ar interna. Fonte: SAELENS, 2002 22

Figura 2.6 - Commerzbank, Frankfurt. Fonte: SAELENS, 2002 23

Figura 2.7 - Briarcliff House, Farnborough. Fonte: SAELENS, 2002..... 24

Figura 2.8 - Aula Magna, Louvain-la-Neuve. Fonte: SAELENS, 2002 24

Figura 2.9 - UCB Building, Bruxelas. Fonte: SAELENS, 2002 25

Figura 2.10 – (a) Edifício Cidade Nova, Rio de Janeiro e (b) detalhe da abertura inferior.
Fonte: PINIWEB..., 2017 25

CAPÍTULO 3

Figura 3.1 – Esquema da célula protótipo 26

Figura 3.2 - Vista esquemática (lateral) da construção da fachada dupla 27

Figura 3.3 – Vista frontal da célula protótipo com a fachada externa..... 28

Figura 3.4 – Vista lateral da célula protótipo com a fachada externa 28

Figura 3.5 - Localização da cidade de Ouro Preto. Fonte: MAPS..., 2016 29

Figura 3.6 -Posição dos termopares de superfície 31

Figura 3.7 - Termopares de superfície instalados na face interna da fachada e na face externa da parede do protótipo e em detalhe, a fixação de um termopar 31

Figura 3.8 – Aparelho Keysigth 34970A..... 32

Figura 3.9 – Anemômetro de fio quente Instrutemp ITAN-800..... 32

Figura 3.10 – Esquema da posição dos anemômetros de fio quente	33
Figura 3.11 – Modelo simulado.....	38
Figura 3.12 – Malha gerada do modelo	39
Figura 3.13 – Condições de contorno do modelo	41
Figura 3.14 - Resultado da convergência	42
Figura 3.15 – Linhas e planos para obtenção dos resultados numéricos.....	43

CAPÍTULO 4

Figura 4.1 - Evolução temporal da temperatura por termopar para a ausência da fachada.....	45
Figura 4.2- Evolução temporal da temperatura por termopar para cavidade em 20cm.....	46
Figura 4.3 - Evolução temporal da temperatura por termopar para cavidade em 15cm.....	47
Figura 4.4 - Evolução temporal da temperatura por termopar para cavidade em 10cm.....	48
Figura 4.5 - Evolução temporal de temperatura média para a espessura da cavidade de ar em 20cm	49
Figura 4.6 – Evolução temporal de temperatura.....	51
Figura 4.7 - Evolução temporal de temperatura durante um dia	54
Figura 4.8 – Número de Richardson.....	56
Figura 4.9 – Evolução temporal de temperatura para cavidade em 20 cm.....	57
Figura 4.10 - Evolução temporal de temperatura para cavidade em 15 cm	58
Figura 4.11 - Evolução temporal de temperatura para cavidade em 10 cm	58
Figura 4.12 – Variação temporal da temperatura para uma fachada dupla (cavidade em 20cm)	60
Figura 4.13 – Variação da temperatura ao longo da linha central transversal de uma fachada dupla (cavidade em 20cm).....	62
Figura 4.14 – Variação da temperatura às 16h (cavidade em 20cm)	63
Figura 4.15 – Vetores de velocidade do escoamento de ar (cavidade em 20cm).....	64
Figura 4.16 – Variação da velocidade do vento na entrada e na saída da cavidade (20cm)	64
Figura 4.17 – Variação da velocidade no plano longitudinal (20cm)	65
Figura 4.18 – Perfil de velocidade ao longo da linha transversal central (20cm)	66
Figura 4.19 – Vetores de velocidade tangencial ao longo do escoamento (20cm)	67
Figura 4.20 - Variação temporal da temperatura para uma fachada dupla (cavidade em 15cm)	68
Figura 4.21 - Variação da temperatura ao longo da linha central transversal de uma fachada dupla (cavidade em 15cm).....	70

Figura 4.22 - Variação da temperatura às 14h (cavidade em 15cm)	70
Figura 4.23 - Variação da temperatura às 16h (cavidade em 15cm)	71
Figura 4.24 - Vetores de velocidade do escoamento de ar (cavidade em 15cm)	72
Figura 4.25 - Variação da velocidade do vento na entrada e na saída da cavidade (15cm)	72
Figura 4.26 - Variação da velocidade no plano longitudinal (15cm)	73
Figura 4.27 - Perfil de velocidade ao longo da linha transversal central (15cm)	74
Figura 4.28 - Vetores de velocidade tangencial ao longo do escoamento (15cm)	74
Figura 4.29 - Variação temporal da temperatura para uma fachada dupla (cavidade em 10cm)	76
Figura 4.30 - Variação da temperatura ao longo da linha central transversal de uma fachada dupla (cavidade em 10cm).....	77
Figura 4.31 - Variação da temperatura às 16h (cavidade em 10cm)	78
Figura 4.32 - Vetores de velocidade do escoamento de ar (cavidade em 10cm)	79
Figura 4.33 - Variação da velocidade do vento na entrada e na saída da cavidade (10cm)	79
Figura 4.34- Variação da velocidade no plano longitudinal (10cm)	80
Figura 4.35 - Perfil de velocidade ao longo da linha transversal central (10cm)	81
Figura 4.36 - Vetores de velocidade tangencial ao longo do escoamento (10cm)	81

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 2.1 - Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão 18

Tabela 2.2 - Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno..... 18

CAPÍTULO 3

Tabela 3.1 - Propriedades dos materiais.....27

Tabela 3.2 - Estatísticas das malhas dos modelos físicos.....40

CAPÍTULO 4

Tabela 4.1 - Desvio padrão médio para as configurações da fachada dupla49

Tabela 4.2 - Velocidade de entrada e saída do vento na cavidade52

Tabela 4.3 - Valores médios das diferenças de temperaturas para o período diurno55

Tabela 4.4 – Erros relativos referente aos resultados experimentais e numéricos59

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1.	Objetivos.....	14
1.2.	Justificativa.....	14
1.3.	Metodologia.....	15
1.4.	Estrutura do trabalho	15
2.	DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES.....	16
2.1.	Normas Nacionais de desempenho.....	16
2.2.	Fachadas Duplas	19
2.3.	Exemplos de construções com fachadas múltiplas.....	23
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1.	Célula protótipo	26
3.2.	Clima local.....	29
3.3.	Aquisição de dados	30
3.4.	Modelo matemático	33
3.5.	Simulação numérica	37
3.5.1.	Modelo simulado	38
3.5.2.	Geração da malha	39
3.5.3.	Definição das condições de contorno	40
3.5.4.	Aquisição dos dados do modelo numérico.....	43
4.	RESULTADOS	44
4.1.	Resultados das medições	44
4.2.	Tipo de convecção	55
4.3.	Simulação numérica	57
4.3.1.	Verificação do modelo numérico	57
4.3.2.	Análise numérica para cavidade em 20cm	59
4.3.3.	Análise numérica para cavidade em 15cm	67
4.3.4.	Análise numérica para cavidade em 10cm	75
5.	CONCLUSÕES.....	83
5.1.	Sugestões para trabalhos futuros	84
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	85
	APÊNDICE A.....	88
	APÊNDICE B.....	90

1. INTRODUÇÃO

Discute-se cada vez mais o uso eficiente da energia, com ênfase para o setor construtivo, onde pesquisas atuais propõem estratégias de redução da demanda energética. De acordo com a Diretiva Europeia 2013/31/EU (OFFICIAL JOURNAL OF THE EUROPEAN UNION, 2010) relativa ao desempenho energético de edifícios, as edificações da União Europeia consomem 40% da energia total do bloco europeu, e esta diretiva obriga os países-membros a adotarem políticas de promoção a construções eficientes.

Enfatizando somente os sistemas de aquecimento, ventilação e ar condicionado (HVAC, *heating, ventilation and air conditioning*), estes são responsáveis por altos consumos energéticos e destaca-se os países de clima predominante quente, como os Emirados Árabes Unidos (UAE), onde os sistemas de refrigeração dos prédios consomem cerca de 60 a 75% da energia gasta na edificação (RADHI, 2009).

Ainda em relação às as edificações, Shameri et al. (2011) destacam as construções envidraçadas convencionais, que apresentam problemas como os relacionados a conforto térmico, ventilação natural e iluminação natural excessiva, especialmente quando localizadas em regiões com altas temperaturas.

Tais problemas incentivam arquitetos e engenheiros a desenvolver novas tecnologias como dispositivos de sombreamento e vidros refletivos, que por outro lado acabam demandando maior utilização de luz artificial e aquecem o ambiente interior gerando mais carga térmica.

No Brasil, desde 2003, existe um programa denominado PROCEL EDIFICA, que desenvolve e apoia projetos na área de conservação de energia em edificações residenciais, comerciais, de serviços e públicas. Conforme o programa, estima-se um potencial de redução de consumo de aproximadamente 30% para edificações existentes e de 50% para edificações novas. Tamanha redução é possível por meio da implementação de ações de eficiência energética nos sistemas de iluminação, ar condicionado e intervenções arquitetônicas na envoltória das construções (BRASIL, 2011).

Diante dos fatos descritos anteriormente, um projeto de construção eficiente leva em consideração o uso racional da energia, sendo destaque o conceito de edificações passivas, onde o ambiente interno é regulado não por sistemas de condicionamento ou aquecimento de

ar mecânicos e sim pela estrutura e *design* da construção e seus componentes (NICOL; HUMPRHEYS; ROAF, 2012). De acordo com Cabeza et al. (2010) a envoltória das construções apresenta um grande potencial no que diz respeito a redução do consumo energético pois possuem determinadas características térmicas e geométricas que, quando expostas ao clima, apontam para uma resposta térmica que propicia condições térmicas adequadas ao conforto térmico dos ocupantes.

Considerando a importância da envoltória no desempenho térmico de uma edificação, a utilização de fachadas duplas vem ganhando espaço no setor construtivo, chamando a atenção de projetistas e pesquisadores como uma inovação de construção (GRACIA et al., 2013). As fachadas duplas também conhecidas como DSF (*double skin façades*), consistem basicamente em uma construção com uma fachada normal e outra fachada adicional externa, usualmente construída em vidro mas que também pode ser de outro material mais opaco. Devido ao espaço entre as fachadas se forma uma cavidade que é preenchida por ar onde é comum a instalação de dispositivos de sombreamento (BARBOSA; IP, 2014). Além da fachada dupla, alguns autores, como Saelens (2002) desenvolveram em seus trabalhos uma fachada múltipla ou *multiple-skin facade*, onde há a presença de mais de duas superfícies.

De acordo com Ding, Hasemi e Yamada (2005), o funcionamento básico de uma fachada dupla se deve ao fenômeno da chaminé térmica que ocorre na cavidade. Tal fenômeno ocorre devido a uma diferença de densidade entre o ar aquecido devido à radiação solar e o ar fresco externo. O ar aquecido é expulso por meio da abertura superior do dispositivo.

Como exemplo de aplicação de uma fachada dupla, destaca-se o Commerzbank em Frankfurt na Alemanha. A construção desse edifício foi concluída em 1997 e seu projeto visa garantir a alta eficiência energética. Na Figura 1.1 e na Figura 1.2 é possível observar o exterior e o interior do edifício, respectivamente.

Devido a importância do tema no contexto global, avalia-se neste trabalho a influência das fachadas duplas no desempenho térmico de edificações.



Figura 1.1 - Vista externa do Commerzbank, Frankfurt.
Fonte: COMMERZBANK..., 2016

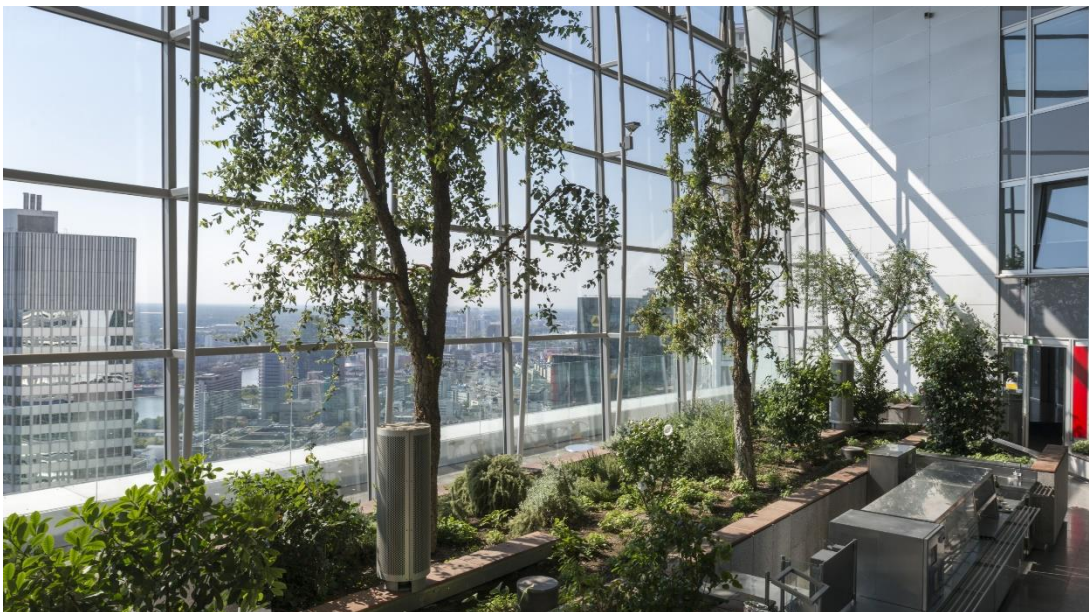


Figura 1.2 - Interior do Commerzbank, Frankfurt.
Fonte: COMMERZBANK..., 2016

1.1. Objetivos

Avaliar o desempenho térmico em edificações com fachada dupla ventilada naturalmente, tendo como foco a análise do fluxo de ar e o processo de transferência de calor na fachada dupla para as condições climáticas da região de Ouro Preto (Zona Bioclimática 3), utilizando-se uma célula protótipo.

No alcance desse objetivo contempla-se os seguintes objetivos específicos:

- caracterizar os parâmetros arquitetônicos que configuram a tipologia da fachada dupla;
- avaliar o fluxo de ar e o processo de troca de calor na fachada dupla via abordagem experimental;
- avaliar o fluxo de ar e o processo de troca de calor na fachada dupla via abordagem numérica;
- verificar a modelagem numérica e a influência da espessura de camada de ar na fachada dupla no desempenho da edificação.

1.2. Justificativa

A fachada dupla ventilada naturalmente, em termos práticos, proporciona vantagens térmicas, construtivas e funcionais. Ela reduz o fluxo de calor do ambiente interno da edificação para o ambiente externo, e vice e versa, permitindo manter a temperatura interna da edificação por um tempo mais prolongado e reduzindo, por consequência, a utilização de sistemas de calefação e/ ou resfriamento.

Outras vantagens da fachada dupla são: diminuição dos efeitos de dilatação do edifício; eliminação dos problemas de condensação; eliminação das pontes térmicas em edificações estruturadas em aço; diminuição dos problemas de infiltração de água (chuva); melhoria do isolamento acústico e proteção das estruturas da ação dos agentes atmosféricos.

Esta tipologia de fachada é ainda pouco utilizada para as condições climáticas brasileiras e o seu potencial de condicionamento passivo, no desempenho de construção, deve ser investigado, a que se propõe este estudo.

A partir de um estudo em uma célula protótipo procura-se investigar o efeito de cada variável (parâmetro) desta tipologia no ambiente construído e com isso julgar as adequações necessárias ao projeto de fachadas duplas para o clima. Assim, esta proposta justifica-se pela contribuição dos estudos sobre a implementação de fachadas duplas para o clima brasileiro.

1.3. Metodologia

O desenvolvimento do trabalho abrange: (a) uma abordagem analítica, por meio da avaliação do fluxo de ar e do processo de convecção na cavidade no interior da fachada dupla, (b) uma abordagem experimental, via medições *in loco*, na célula protótipo e, (c) uma abordagem numérica, pela avaliação do fluxo de ar e do processo de convecção na cavidade no interior da fachada dupla.

Para a análise *in loco*, utiliza-se em uma célula protótipo construída na cidade de Ouro Preto – MG, especificamente no Campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto.

Já para a abordagem numérica, utiliza-se o software ANSYS/CFX tendo como foco a análise do fluxo de ar e o processo de convecção de calor na cavidade da fachada dupla.

1.4. Estrutura do trabalho

Esta dissertação está dividida em 5 capítulos. O capítulo 1 introduz os temas relacionados ao trabalho e descreve objetivos, justificativa e metodologia.

O capítulo 2 contém uma revisão sobre desempenho térmico de edificações, que se torna importante para o desenvolvimento e entendimento do trabalho. Portanto, neste capítulo, são descritas as normas nacionais de desempenho, as características das fachadas duplas e são apresentados alguns exemplos de construções que já aproveitam desta tecnologia.

Já no capítulo 3, são apresentados os materiais e métodos adotados, incluindo as análises experimental, analítica e numérica.

O capítulo 4 expõe as análises dos resultados, e o capítulo 5 as conclusões e sugestões para o desenvolvimento de pesquisas futuras. Finaliza-se a dissertação com as referências bibliográficas utilizadas na pesquisa e com os apêndices e anexos.

2. DESEMPENHO TÉRMICO DE EDIFICAÇÕES

Desde os primórdios da humanidade, o homem buscou construir suas residências de forma a se abrigar do calor ou frio. Para tanto, com o passar do tempo, tecnologias que atendessem os parâmetros construtivos de beleza, utilidade e solidez foram aprimoradas. O desenvolvimento da luz artificial e dos sistemas HVAC trouxeram conforto e tornaram-se elementos importantes nos projetos arquitetônicos atuais.

Correlacionando os fatos descritos e a preocupação crescente com a demanda de energia global, levanta-se um novo parâmetro para a área da construção, e assim consolida-se a eficiência energética em edificações.

Portanto, ao mencionar a questão do desempenho térmico de edificações, além da questão do conforto humano, deve-se considerar a eficiência térmica. É neste contexto que se iniciam novas pesquisas, de forma a equalizar conforto humano e eficiência energética.

No Brasil, as diretrizes da norma NBR 15220 (ABNT, 2005) e da norma NBR 15575 (ABNT, 2013) definem as questões de desempenho térmico das edificações.

2.1. Normas Nacionais de desempenho

De acordo com a norma NBR 15220 (ABNT, 2005), a avaliação de desempenho térmico de uma edificação pode ser feita na fase de projeto ou após a construção.

[...] Em relação à edificação construída, a avaliação pode ser feita através de medições *in loco* de variáveis representativas do desempenho, enquanto que na fase de projeto esta avaliação pode ser feita por meio de simulação computacional ou através da verificação do cumprimento de diretrizes construtivas.[...] (ABNT, 2005, p.2)

Tanto a norma NBR 15220 (ABNT, 2005) quanto a norma NBR 15575 (ABNT, 2013) estabelecem um zoneamento bioclimático do Brasil conforme mostrado na Figura 2.1, em que as exigências de desempenho térmico estão em função das oito zonas bioclimáticas apresentadas.

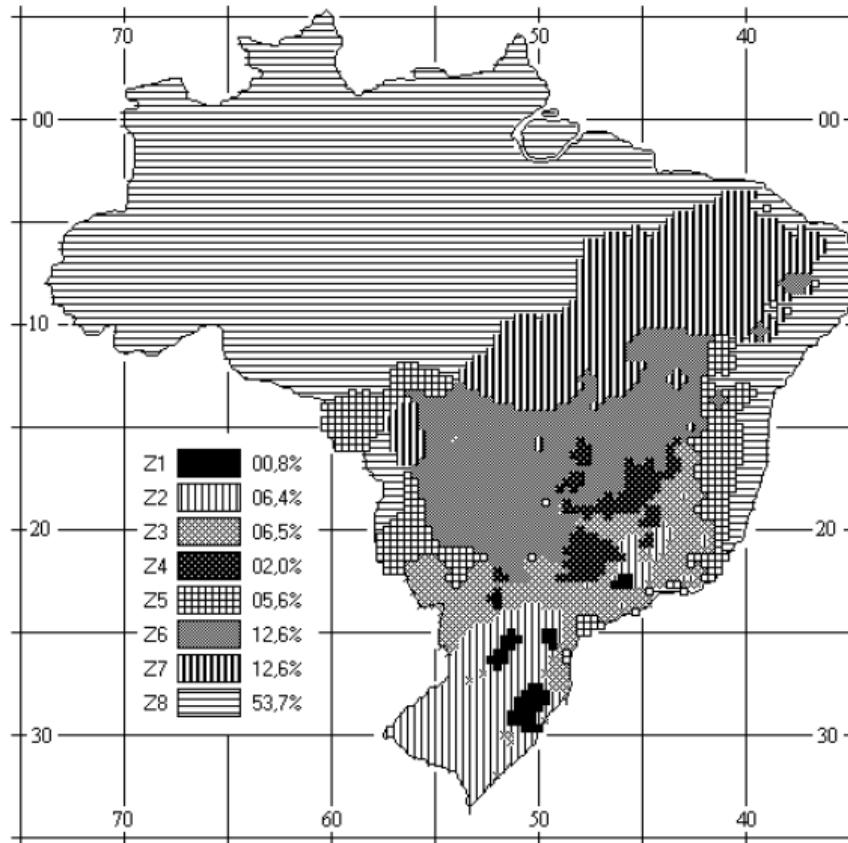


Figura 2.1 - Zoneamento bioclimático Brasileiro.
Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005)

De acordo com a norma NBR 15575 (ABNT, 2013), o valor máximo diário da temperatura do ar no interior de recintos de permanência prolongada, como por exemplo salas e dormitórios, sem a presença de fontes internas de calor (ocupantes, lâmpadas, outros equipamentos em geral), deve ser sempre menor ou igual ao valor máximo diário da temperatura do ar exterior, para condições de verão, como nível mínimo.

Os valores mínimos diários da temperatura do ar interior de recintos de permanência prolongada em um dia típico de inverno¹, devem ser sempre maiores ou igual à temperatura mínima externa acrescida de 3 °C.

Para maior conforto dos usuários recomenda-se para os níveis mínimo (*M*), intermediário (*I*) e superior (*S*), os valores conforme apresentados na Tabela 2.1 e Tabela 2.2. No caso da avaliação utilizando-se protótipos a norma recomenda que este seja construído sem que haja

¹Dia típico de verão e de inverno são caracterizados pela frequência da ocorrência das condições climáticas ao longo do período de verão e de inverno e representam as condições mais significativas do período.

obstrução por elementos externos: as paredes e as janelas dos protótipos devem ser desobstruídas (sem presença de edificações ou vegetação nas proximidades que modifiquem a incidência de sol e/ou vento).

Tabela 2.1 - Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de verão

Nível de Desempenho	Critérios	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
M	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$
I	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2 \text{ °C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 1 \text{ °C})$
S	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 4 \text{ °C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2 \text{ °C})$ e $T_{i,min} \leq (T_{e,min} + 1 \text{ °C})$
$T_{i,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius; $T_{e,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius; $T_{i,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius; $T_{e,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius; NOTA Zonas bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3.		

Fonte: NBR 15575 (ABNT, 2013)

Tabela 2.2 - Critério de avaliação de desempenho térmico para condições de inverno

Nível de Desempenho	Critérios	
	Zonas 1 a 5	Zonas 6, 7 e 8
M	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3 \text{ °C})$	Nestas zonas, este critério não precisa ser verificado
I	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 5 \text{ °C})$	
S	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 7 \text{ °C})$	
$T_{i,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius; $T_{e,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no exterior da edificação, em graus Celsius. NOTA Zonas bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3: 2005.		

Fonte: NBR 15575 (ABNT, 2013)

Em relação ao período de medição, a norma recomenda que o dia tomado para análise deve corresponder a um dia típico de projeto, de verão ou de inverno, precedido por pelo menos um dia com características semelhantes. Recomenda-se, como regra geral, trabalhar com uma sequência de três dias e analisar os dados do terceiro dia. Para efeito da avaliação por medição, o dia típico é caracterizado unicamente pelos valores da temperatura do ar exterior medidos no local.

Destaca-se que mesmo atendendo aos critérios da norma NBR 15575 (ABNT, 2013), o conforto térmico não pode ser garantido, uma vez que dentro de uma mesma zona bioclimática é possível encontrar duas cidades com características climáticas diferentes, como Belo Horizonte que é uma cidade de clima continental e Santos, que é uma cidade litorânea. Nota-se também que mesmo em condições extremas de frio e de calor no ambiente externo é

possível obter uma temperatura de conforto no ambiente interno, de modo que se torna improvável a garantia do conforto térmico nesta situação.

2.2. Fachadas Duplas

Apesar do emprego e desenvolvimento de pesquisas em fachadas duplas ser relativamente atual, encontra-se na literatura menções ao mecanismo desde 1849, quando Jean-Baptiste Jobard, diretor do Museu Industrial de Bruxelas na época, descreveu uma versão de múltiplas fachadas ventiladas mecanicamente, de modo que no inverno o ar quente deveria circular entre duas paredes de vidro enquanto que no verão, o ar frio deveria circular a fim de manter o conforto térmico da edificação (de RUITER, 1998 apud SAELENS, 2002).

Wong, Prasad e Behnia (2008) descrevem uma fachada dupla como uma construção com várias camadas, ou seja, uma fachada externa, um espaço intermediário e uma fachada interna, sendo ainda possível a instalação de dispositivos de sombreamento no espaço intermediário. Há a presença de aberturas inferiores e superiores que promovem o fluxo de ar.

Devido às demandas de conforto e às leis de incentivo ao uso eficiente da energia, as fachadas duplas se tornaram uma tendência arquitetônica na Europa. As principais demandas ao se propor uma fachada dupla estão relacionadas ao aspecto estético e luminoso, à diminuição de ruídos no interior de edificações localizadas em áreas com poluição sonora e à redução do uso da energia.

Além do termo em inglês *Double Skin Façade (DSF)*, outros termos similares podem ser encontrados na literatura para a identificação de uma fachada dupla (POIRAZIS, 2006), como: *Active Façade* (quando a ventilação na cavidade é mecânica), *Passive Façade* (quando a ventilação na cavidade é natural), *Double Façade*, *Double Envelope (Façade)*, *Dual-Layered Glass Façade*, *Dynamic Façade*, *Wall-Filter Façade*, *Environmental Second Skin System*, *Energy Saving Façade*, *Ventilated Façade*, *Double-Leaf Façade*, *Energy Saving Façade*, *Environmental Façade*, *Multiple-Skin Façades*, *Intelligent Glass Façade*, *Second Skin Façade/System*, *Airflow Window*, *Supply Air Window*, *Exhaust Window/Façade*, *Double Skin Curtain Wall*, *Twin Skin Facade*.

Observando os dois primeiros termos da lista, percebe-se a classificação de uma fachada dupla de acordo com a natureza do fluxo de ar, que pode ser naturalmente ventilada (*Passive*

Façade) ou mecanicamente ventilada (*Active Façade*). Apresenta-se na Figura 2.2 os dois tipos de fachada dupla.

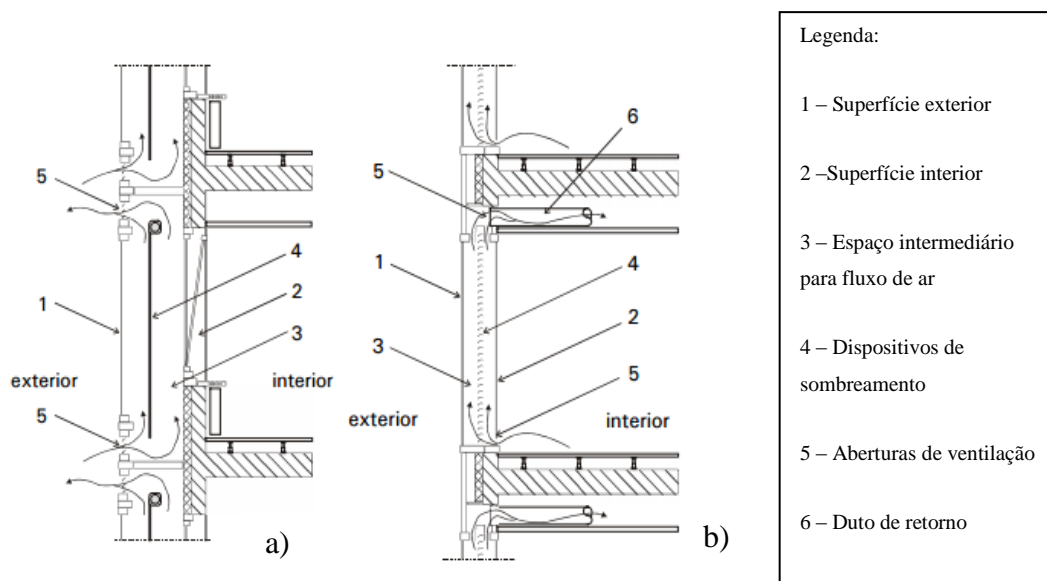


Figura 2.2 - Fachadas Duplas (a) naturalmente ventiladas e (b) mecanicamente ventiladas.
Fonte: SAELENS, 2002

A fachada dupla naturalmente ventilada pode ser enquadrada nas estratégias de construção passiva em que as condições do ambiente interior são reguladas de acordo com o desenho arquitetônico e estrutura da construção e não por sistemas mecânicos, como os HVAC (NICOL; HUMPHREYS; ROAF, 2012). De acordo com Barbosa e Ip (2014) a aplicação de fachadas duplas pode ser uma solução inteligente visando a eficiência energética quando se projeta edifícios com fachadas transparentes, comuns nas construções modernas.

Observando o esquema mostrado na Figura 2.2, o mecanismo de funcionamento de uma fachada dupla pode ser assim descrito: o ar presente no espaço intermediário é aquecido devido à radiação solar e as aberturas na fachada promovem o fluxo deste ar pelo efeito chaminé (*stack effect*). Assim o ar fresco entra pela abertura inferior e o ar quente é eliminado pela abertura superior da cavidade. No verão, o ar em alta temperatura no espaço intermediário é removido com o fluxo de ar promovendo uma redução da carga de refrigeração do edifício. Já no inverno, as aberturas são fechadas a fim de proteger o escape de ar quente oriundo do espaço ocupado pelas pessoas (DING; HASEMI; YAMADA, 2005).

Deve se destacar que a implementação de uma fachada dupla é acompanhada de desafios, devido à complexidade relacionada às trocas de calor e ao movimento do fluxo de ar além da variação dos aspectos climáticos de cada região do planeta (QUESADA et al; 2012). Na

Figura 2.3 apresenta-se o esquema de uma fachada dupla desenvolvida por Høseggen, Wachenfeldt e Hanssen (2008) onde é possível observar os variados fenômenos como convecção, condução, radiação, reflexão, transmitância, difusão.

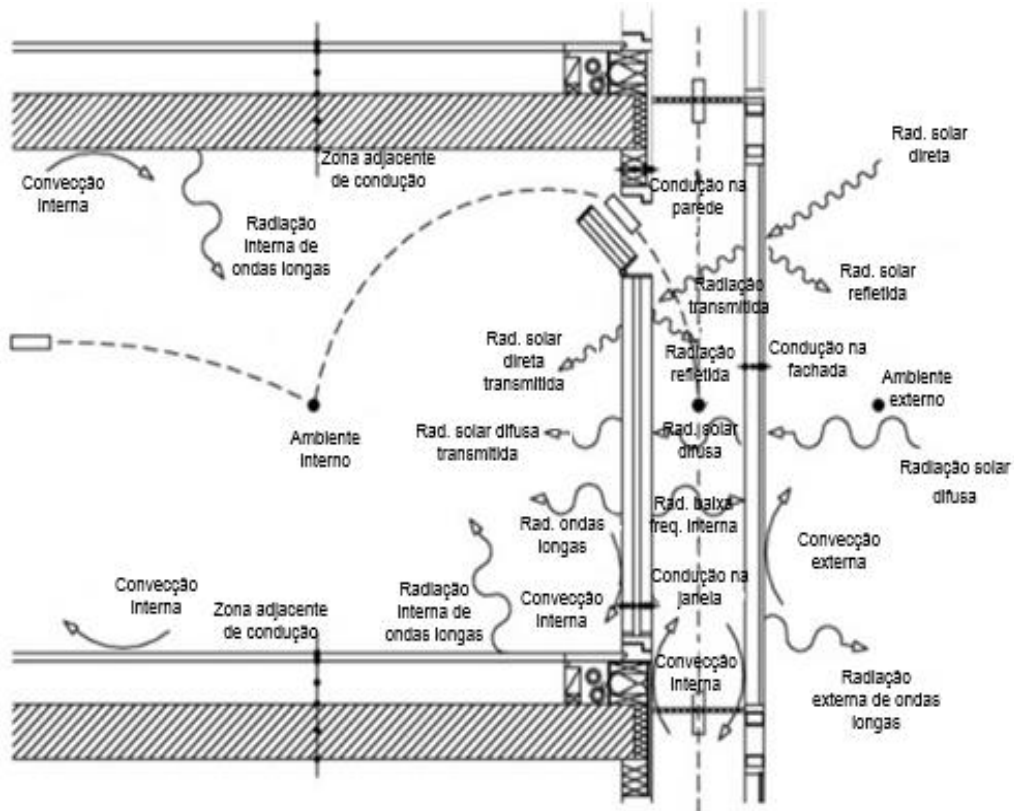
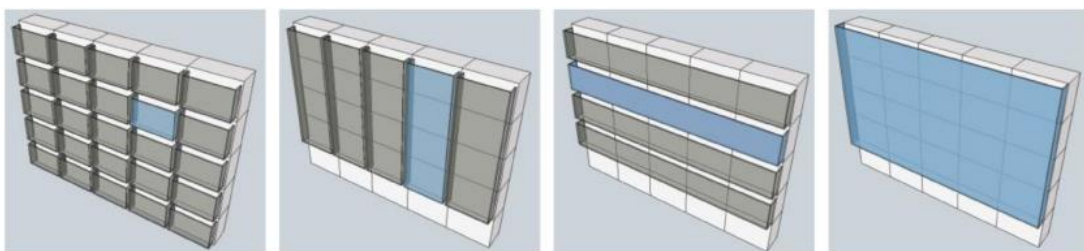


Figura 2.3 - Corte transversal de uma fachada dupla com o esquema da transferência de calor e do fluxo de ar

Fonte: HØSEGGEN; WHACHENFELDT; HANSSSEN, 2008

A classificação de uma fachada dupla ocorre de acordo com sua estrutura ou com o tipo de divisão do espaço intermediário, conforme apresentado na Figura 2.4 (OESTERLE et al; 2001).



a)

b)

c)

d)

Figura 2.4 - Classificação das fachadas duplas: a) Box window, b) Shaft-box, c) Corridor, d) Multi-storey.

Fonte OESTERLE et al; 2001

Deste modo, observando as configurações apresentadas na Figura 2.4, uma fachada dupla do tipo *Box window* tem sua cavidade dividida horizontalmente e verticalmente ao longo da construção. Já a do tipo *Shaft-box*, a divisão ocorre apenas verticalmente e contribui com o efeito chaminé. Na fachada dupla do tipo *Corridor* a divisão se apresenta horizontalmente apenas por razões de acústica, segurança contra incêndios ou ventilação, e por fim o tipo *Multi-storey* apresenta a cavidade totalmente conectada e a ventilação é feita pela base e pelo topo da construção. Como cada tipo de divisão apresentam benefícios e prejuízos, cabe ao projetista identificar a melhor configuração de acordo com o problema real.

Outra classificação comum das fachadas duplas é quanto à origem do fluxo de ar. Três conceitos são empregados: alimentação, remoção e cortina de ar (SAELENS, 2002). Apresenta-se na Figura 2.5 as fachadas duplas de acordo com o fluxo de ar.

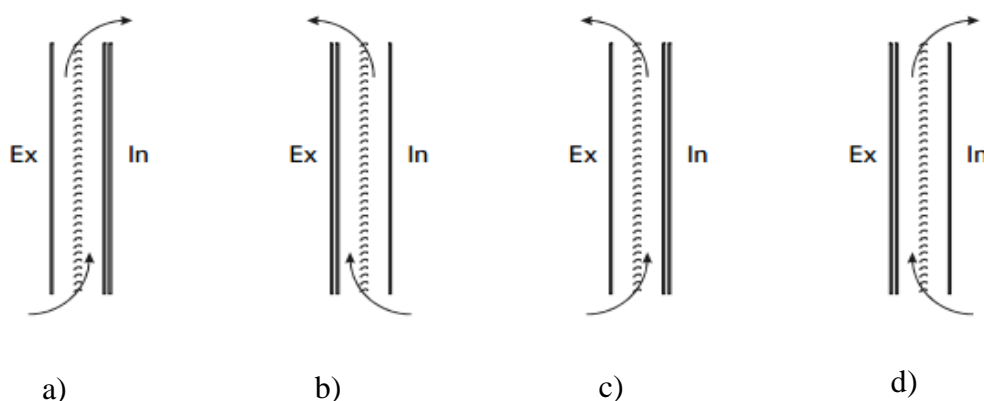


Figura 2.5 - Tipos de origem do fluxo de ar: a) alimentação, b) remoção, c) cortina de ar externa d) cortina de ar interna.

Fonte: SAELENS, 2002

Tomando o esquema na Figura 2.5, percebe-se que no tipo alimentação o ar fresco externo flui através da cavidade atingindo o ambiente interno por meio de aberturas. Já no tipo de remoção, o ar interno flui através da cavidade até o ambiente externo. Por fim, no tipo cortina de ar, o ar flui do mesmo lado, ou seja, o ar vem do exterior e sai para o exterior (normalmente empregado com ventilação natural), assim como no lado interior (normalmente empregado com ventilação forçada).

É comum encontrar na literatura paredes duplas construídas basicamente em vidro, porém, como proposto neste trabalho, alguns autores, como Fallahi, Haghghat e Elsadi (2010) desenvolvem pesquisas com outros tipos de materiais não translúcidos, com o objetivo de

provar a influência do tipo de material. Tomando o concreto como exemplo, este material apresenta uma maior resistência térmica e consequente maior atraso térmico² quando comparado ao vidro, o que contribui para o conforto térmico no interior da edificação, porém perde em iluminação natural.

2.3. Exemplos de construções com fachadas múltiplas

Saelens (2002) apresenta uma lista de edificações que utilizam fachada dupla, descrevendo vários exemplos naturalmente ou mecanicamente ventilados (FAIST, 1998 apud SAELENS, 2002; BBRI, 2001 apud SAELENS, 2002). Oesterle et al. (2001) descrevem dez exemplos de sucesso na Alemanha.

Dentre as construções modernas, destaca-se novamente o Commerzbank (Figura 2.6), localizado em Frankfurt, na Alemanha. Neste caso a origem do fluxo de ar é alimentação/remoção e possui uma estrutura do tipo *Box-window* sendo naturalmente ventilado (SAELENS, 2002).



Figura 2.6 - Commerzbank, Frankfurt.
Fonte: SAELENS, 2002

²Atraso térmico é o tempo transcorrido entre uma variação térmica em um meio e sua manifestação na superfície oposta de um componente construtivo submetido a um regime periódico de transmissão de calor – inércia térmica (ABNT, 2005).

Salienta-se também o Briarcliff House (Figura 2.7) localizado em Farnborough, Reino Unido. Neste exemplo, o fluxo de ar é do tipo alimentação/remoção e a estrutura é do tipo *Multi-storey* mecanicamente ventilada (SAELEN, 2002).



Figura 2.7 - Briarcliff House, Farnborough.
Fonte: SAELEN, 2002

Outro exemplo é o Aula Magna de Louvain-la-Neuve na Bélgica. Na Figura 2.8 apresenta-se essa edificação, que possui tecnologia de fachada dupla com fluxo de ar do tipo cortina de ar externa, divisão da fachada do tipo *Box-window* além de ser naturalmente ventilada (SAELEN, 2002).



Figura 2.8 - Aula Magna, Louvain-la-Neuve.
Fonte: SAELEN, 2002

Já o UCB Centre de Bruxelas na Bélgica (Figura 2.9) apresenta fluxo de ar do tipo cortina de ar interna, fachada dupla do tipo *Box-window* mecanicamente ventilada (SAELEN, 2002).



Figura 2.9 - UCB Building, Bruxelas.
Fonte: SAELEN, 2002

No Brasil já é possível encontrar edificações com a tecnologia de fachada dupla. Pode-se citar como exemplo o edifício Cidade Nova, situado no Rio de Janeiro (Figura 2.10). Este edifício construído em 2008 apresenta fachada dupla do tipo *Multi-storey* naturalmente ventilada e a origem do fluxo de ar do tipo cortina externa.



(a)



(b)

Figura 2.10 – (a) Edifício Cidade Nova, Rio de Janeiro e (b) detalhe da abertura inferior.
Fonte: PINIWEB..., 2017

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O desenvolvimento do trabalho abrange: (a) uma abordagem experimental via medições *in loco*, na célula protótipo, e (b) uma abordagem numérica, na avaliação do fluxo de ar e do processo de convecção.

3.1. Célula protótipo

A análise da fachada dupla é feita em uma célula protótipo construída em Ouro Preto – MG, no Campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto.

A célula protótipo consiste em um cômodo de uma casa de interesse popular e tem as dimensões 3,50 m x 3,05 m, pé direito de 3,0 m, telhado em uma água, construída em alvenaria e pintada na cor branca a fim de aumentar a reflexão da radiação solar e contribuir para o conforto térmico no interior. O projeto da célula protótipo está apresentada na Figura 3.1.

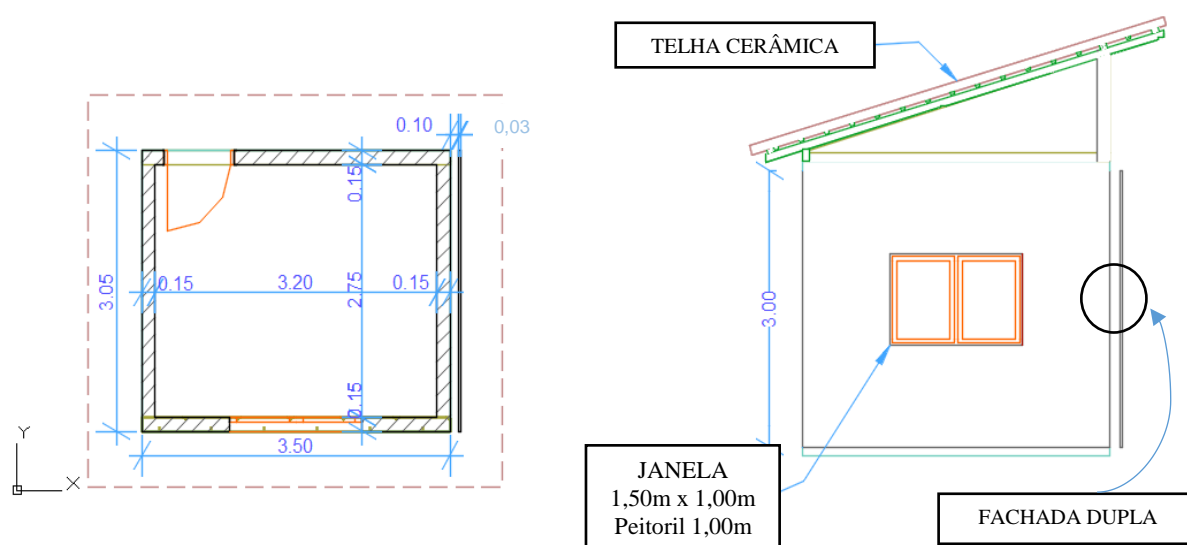


Figura 3.1 – Esquema da célula protótipo

Observa-se na Figura 3.1 a presença da fachada externa ao protótipo posicionada de modo a receber insolação direta no período da tarde, medindo 3,05 de largura por 2,70 m de altura, construída de placas cimentícias de espessura 0,003 m e posicionada a uma altura em relação ao solo de 0,15m. Este dispositivo é instalado de modo a permitir a variação da espessura da cavidade preenchida pelo ar em 20 cm, 15 cm e 10 cm conforme o esquema apresentado na Figura 3.2. As propriedades dos materiais empregados são apresentadas na Tabela 3.1.

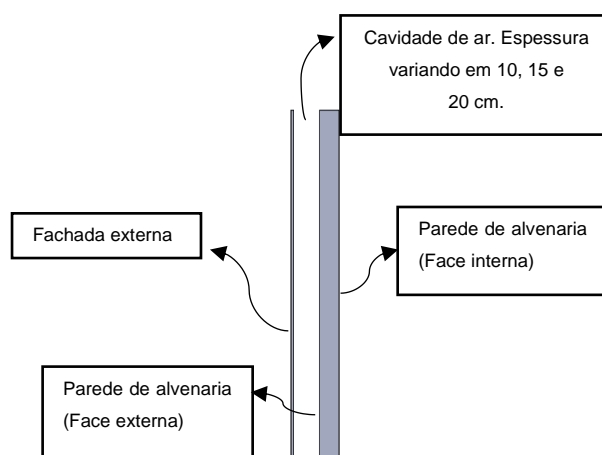


Figura 3.2 - Vista esquemática (lateral) da construção da fachada dupla

Tabela 3.1 - Propriedades dos materiais

Material	Propriedades			
	Massa específica [kg/m ³]	Condutividade térmica [W/(m.K)]	Calor específico [kJ/(kg.K)]	Espessura [m]
Tijolo cerâmico	1600	0,90	0,92	0,09
Argamassa comum	2000	1,15	1	0,03
Placa cimentícia	2200	0,95	0,84	0,03

Fonte: NBR 15220 (ABNT, 2005)

De acordo com Barbosa e Ip (2014) e Pappas e Zhai (2008) a espessura da camada de ar de uma fachada dupla pode variar entre 10 cm a mais de 2 m de acordo com as diferenças de projeto, como presença ou não de dispositivos de sombreamento e acesso à cavidade para manutenção e limpeza. No caso deste trabalho, as espessuras escolhidas estão relacionadas com a proporcionalidade em relação à dimensão do protótipo, e às aberturas laterais da fachada dupla foram fechadas. A partir das informações apresentadas, percebe-se que a fachada dupla construída é do tipo *Multi-storey* com cortina de ar externa.

Na Figura 3.3 e na Figura 3.4 é apresentado o protótipo onde é possível perceber a fachada externa instalada assim como as dimensões.



Figura 3.3 – Vista frontal da célula protótipo com a fachada externa



Figura 3.4 – Vista lateral da célula protótipo com a fachada externa

3.2. Clima local

A cidade de Ouro Preto – MG encontra-se 20°23'08" de latitude sul e 43°30'29" de longitude oeste, estando a uma altitude de 1.179 m. Caracteriza-se por possuir clima tropical de altitude úmido, característico de regiões montanhosas, com chuvas durante os meses de dezembro a março e geadas raras em junho e julho. Ainda assim, de acordo com o zoneamento proposto pela norma NBR15220 (ABNT, 2005) a cidade de Ouro Preto localiza-se na zona bioclimática 3. Na Figura 3.5 está indicada a localização da cidade de Ouro Preto no mapa do Brasil.



Figura 3.5 - Localização da cidade de Ouro Preto.

Fonte: MAPS..., 2016

A obtenção da temperatura externa é possível a partir de uma estação meteorológica instalada no campus da Universidade Federal de Ouro Preto.

Os equipamentos de medição que viabilizaram a execução deste trabalho são apresentados em detalhes na seção 3.3.

3.3. Aquisição de dados

Por meio de medições *in loco*, é feita a análise do fluxo de ar e o monitoramento das temperaturas na face interna da fachada dupla e nas faces externa e interna da parede do protótipo. As medições iniciam-se em outubro de 2016 e encerram-se em dezembro de 2016.

A coleta de dados se dá considerando quatro situações relacionadas com a fachada. Na primeira situação os dados foram coletados sem a fachada externa, ou seja, os dados coletados se referem somente às temperaturas da face externa e interna da parede do protótipo e neste caso a velocidade do vento não é medida, pois não há uma cavidade.

As demais situações já contam com a fachada instalada e variando a espessura da cavidade em 20 cm, 15 cm e 10 cm, sendo que para estas situações, além das temperaturas das faces da parede do protótipo, coleta-se também a temperatura da face interna da fachada, além da velocidade do vento no interior da cavidade da fachada dupla.

Faz-se a aquisição das temperaturas externa (ambiente), da face interna da fachada e das faces da parede do protótipo, além da velocidade do vento que entra na cavidade.

Termopares de superfície do tipo K são instalados na face interna da fachada e nas faces interna e externa da parede do protótipo. É possível observar a disposição exata dos termopares em cada face e a numeração de cada um por meio do esquema mostrado na Figura 3.6.

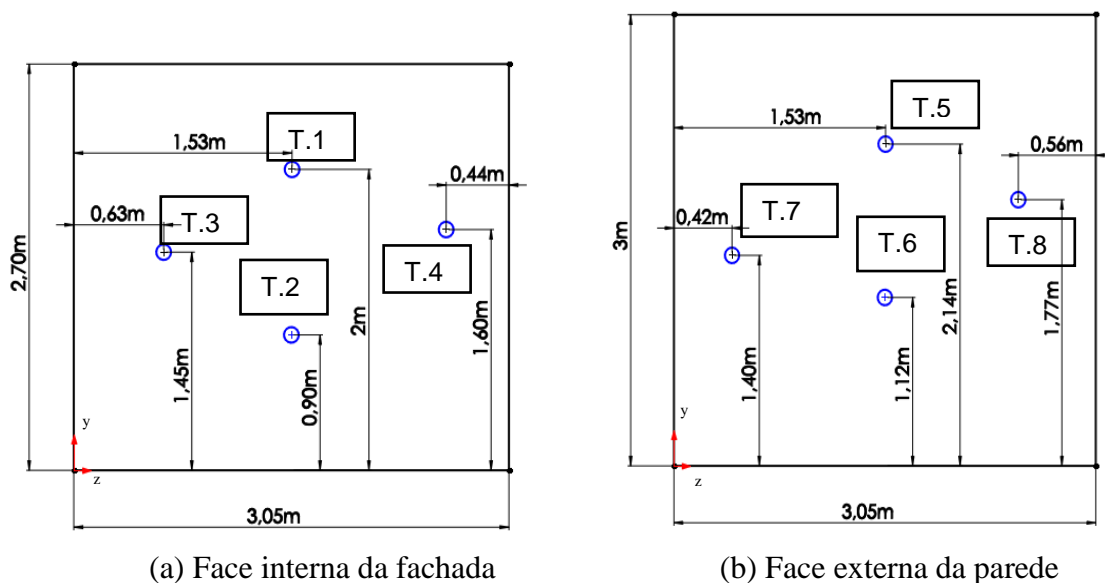
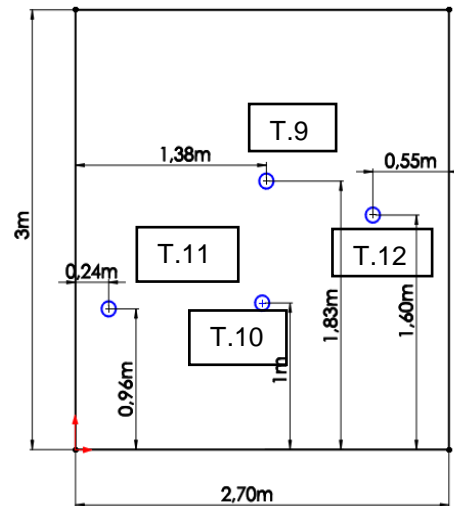


Figura 3.6 -Posição dos termopares de superfície



(c) Face interna da parede

Figura 3.6 -Posição dos termopares de superfície

Por meio do esquema mostrado na Figura 3.6, percebe-se que cada face recebe quatro termopares que são fixados de modo que na linha central encontram-se duas unidades e os outros dois restantes encontram-se um no lado esquerdo e outro no lado direito, tomando a linha central como referência. As posições de instalação dos termopares foram assim definidas a fim de verificar a variação de temperatura nas faces. Ressalta-se que os termopares foram previamente calibrados.

A instalação dos termopares de superfície na face interna da fachada e na face externa da parede do protótipo é apresentado com detalhe na Figura 3.7.

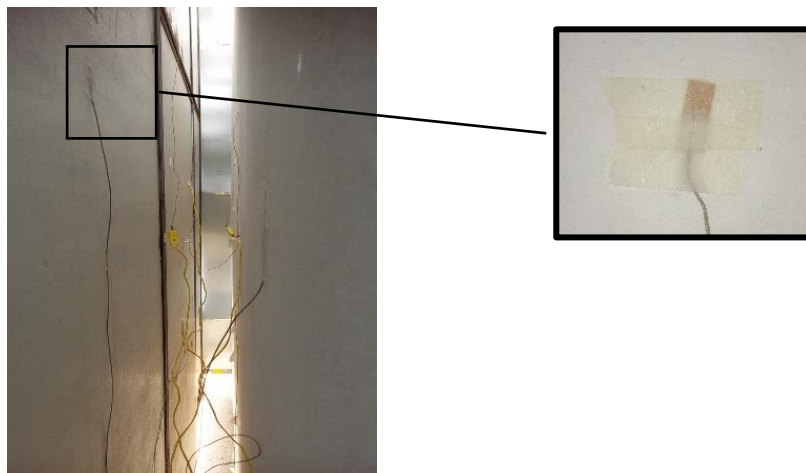


Figura 3.7 - Termopares de superfície instalados na face interna da fachada e na face externa da parede do protótipo e em detalhe, a fixação de um termopar

A aquisição dos sinais dos termopares é realizada por meio do aparelho Keysight 34970A (Figura 3.8) que envia as informações ao software Benchlink Data Logger 3 instalado em um microcomputador. O período de coleta se dá em 72 h ininterruptas e em intervalos de 5 minutos para cada espessura da cavidade, e ocorre durante os meses de novembro e dezembro do ano de 2016.



Figura 3.8 – Aparelho Keysight 34970A

A velocidade do ar é medida na abertura inferior da cavidade por meio de dois anemômetros de fio quente e na abertura superior por meio de um anemômetro de fio quente. Os anemômetros são da marca Instrutemp, modelo ITAN-800 conforme apresentado na Figura 3.9.



Figura 3.9 – Anemômetro de fio quente Instrutemp ITAN-800

As posições dos anemômetros de fio quente podem ser visualizadas por meio do esquema mostrado na Figura 3.10.

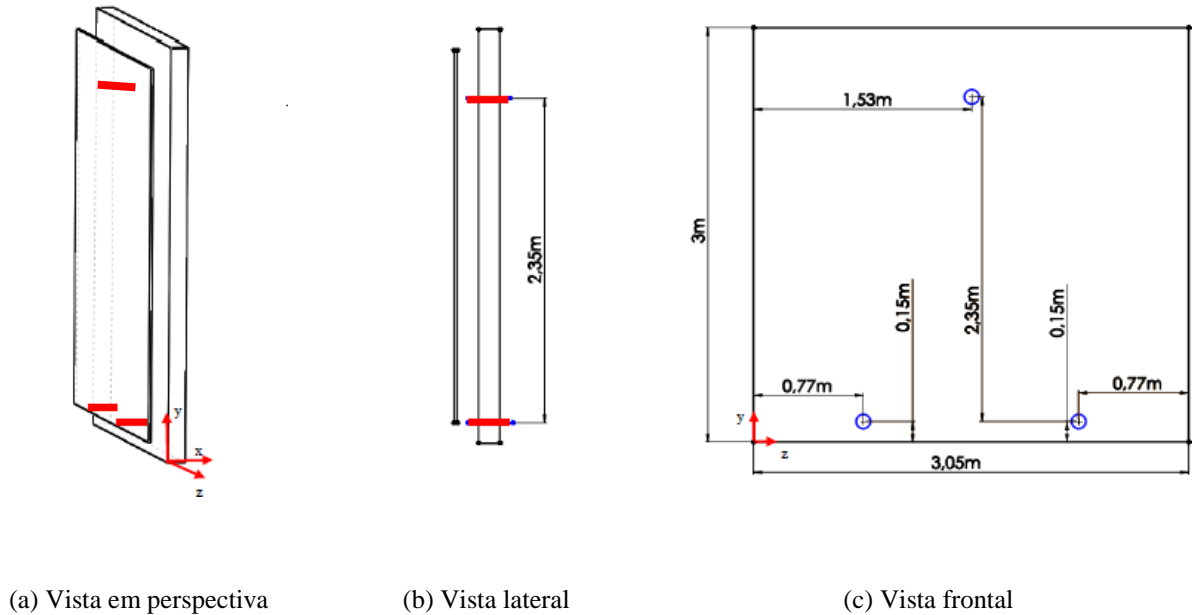


Figura 3.10 – Esquema da posição dos anemômetros de fio quente

Como pode ser visualizado na Figura 3.10, os anemômetros de fio quente são posicionados rente à abertura inferior e um pouco abaixo da abertura superior de modo a evitar influência de fatores externos. Destaca-se também que os sensores são posicionados centralizados entre a fachada e a parede de alvenaria. A centralização entre a fachada e a parede de alvenaria evita a obtenção de velocidades nulas (ou muito baixas) devido à condição de não escorregamento junto às faces, sendo que para o anemômetro superior é possível a obtenção de valores máximos de velocidade devido ao escoamento completamente desenvolvido.

Neste caso, a coleta de dados se dá nos próprios anemômetros de modo que são salvas amostras em intervalos de 10 min, sendo que para cada amostra, o aparelho é configurado para coletar a média de velocidade em 10 s devido à flutuabilidade comum da velocidade do ar. Este procedimento é realizado no período diurno, nos mesmos dias da coleta de temperatura.

3.4. Modelo matemático

A fim de determinar a performance térmica de uma fachada dupla, Guillén et al. (2014) afirmam que a parte sólida e o ar devem ser distinguidas, sendo que para a parte sólida a

distribuição de temperatura é dada pela transferência de calor por condução. Já para o ar, que ocorre entre as superfícies sólidas, os demais modos de transferência de calor devem ser considerados, portanto além da condução adiciona-se a convecção e radiação.

Deste modo, a equação da condução de calor é apresentada na Eq.(3.1).

$$\nabla(k\nabla T) = \rho c_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (3.1)$$

onde k é a condutividade térmica do material ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$), T é a temperatura (K), ρ é a massa específica do material (kg.m^{-3}), c_p é o calor específico do material ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$) e t é o tempo (s).

Considerando a condução unidimensional em uma placa plana, a Eq.(3.1) pode ser escrita como:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (3.2)$$

A fachada dupla é construída por uma parede externa de placas cimentícias que recebe a radiação solar direta. Parte desta radiação é absorvida, parte é refletida e outra parte transmitida. Observa-se que a fachada é opaca e pintada de branca de modo que contribui com a reflexão e diminui a transmissão da radiação. A radiação das faces sólidas pode ser descrita pela Eq. (3.3) também conhecida como Equação de Stefan-Boltzmann.

$$E = \epsilon \sigma T^4 \quad (3.3)$$

onde E é o fluxo de energia radiativa emitida por unidade de área (W.m^{-2}), ϵ é a emissividade da superfície, T é a temperatura da superfície (K) e σ é a constante de Stefan-Boltzmann cujo valor é igual a $5,6704 \times 10^{-8} \text{ W.m}^{-2}\text{K}^{-4}$.

Já o movimento do ar em uma fachada dupla é governado pelas equações de conservação da massa (3.4), momento (3.5) e energia (3.6). Neste caso, o fluido é incompressível e considera-se a aproximação de Boussinesq para convecção natural em que as propriedades do fluido são consideradas constantes exceto a variação da massa específica no termo de flutuabilidade.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

$$\rho \frac{\partial(u)}{\partial t} + \rho \frac{\partial(uu)}{\partial x} + \rho \frac{\partial(vu)}{\partial y} + \rho \frac{\partial(wu)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \frac{\partial(v)}{\partial t} + \rho \frac{\partial(uv)}{\partial x} + \rho \frac{\partial(vv)}{\partial y} + \rho \frac{\partial(wv)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) + g\rho\beta(T - T_{ref.}) \quad (3.5)$$

$$\rho \frac{\partial(w)}{\partial t} + \rho \frac{\partial(uw)}{\partial x} + \rho \frac{\partial(vw)}{\partial y} + \rho \frac{\partial(ww)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) \quad (3.6)$$

onde u , v , w são as componentes de velocidade (m.s^{-1}) nas direções x , y , z respectivamente, ρ é a massa específica do fluido (kg.m^{-3}), α é a difusividade térmica do fluido igual a $k/\rho c_p$ ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$), ν é a viscosidade cinemática do fluido ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$) e β é o coeficiente de expansão térmica do fluido (K^{-1}).

Ainda assim, Manz, Schaelin e Simmler (2004) afirmam que para uma fachada dupla ventilada, o tipo de convecção mista pode ocorrer em função das condições locais do vento e da espessura da fachada. A definição do tipo de convecção é dada pelo número de Richardson (R_i), que é expresso pela Eq.(3.7).

$$R_i = \frac{G_r}{R_e^2} \quad (3.7)$$

onde G_r é o número de Grashof e, R_e é o número de Reynolds, dado pelas expressões Eq. (3.8) e Eq.(3.9), respectivamente.

$$G_r = \frac{g\beta(T_1 - T_2)L^3}{\nu^2} \quad (3.8)$$

onde g é a força da gravidade (m.s^{-2}), L é o altura da placa (m). As propriedades do fluido são tomadas a partir da temperatura média entre a temperatura da face interna da fachada, T_1 , e a temperatura da face externa da parede, T_2 , respectivamente.

$$R_e = \frac{VD_h}{\nu} \quad (3.9)$$

onde V é a velocidade do fluido (m.s^{-1}), D_h o diâmetro hidráulico da seção (m).

Para $R_i \ll 1$, a convecção natural é desprezível, já para $R_i \gg 1$, a convecção forçada é desprezível, enquanto que para $R_i = 1$, a convecção combinada ocorre. Sendo assim, no caso deste estudo, fez-se necessário a avaliação do tipo de convecção presente.

Ao considerar um escoamento com número de Reynolds acima de 4000, a turbulência é inerente. Um fluxo turbulento é sempre tridimensional, instável, rotacional e irregular e a irregularidade é devido a não-linearidade das Equações de Navier-Stokes para este caso (CHEN; JAW, 1998). Deste modo, torna-se necessário a utilização de um modelo de turbulência. Dentre os modelos de turbulência, o modelo $k-\varepsilon$ destaca-se devido à robustez, precisão e estabilidade.

O modelo $k-\varepsilon$ é um modelo de duas equações baseado no conceito de viscosidade turbulenta. k representa a energia cinética da turbulência e ε é a dissipação viscosa da energia cinética turbulenta e então introduzem a viscosidade turbulenta ao escoamento. Este modelo foi proposto por Jones e Lauder em 1972 e melhorado por Lauder e Sharma em 1974 (GABBI, 2013). Assim, a viscosidade dinâmica turbulenta é dada pela Eq.(3.10).

$$\mu_t = c_\mu \rho \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.10)$$

onde μ_t é a viscosidade dinâmica turbulenta (N.s.m^{-2}), c_μ é uma constante com valor definido igual a 0,09, k é a energia cinética turbulenta ($\text{m}^2.\text{s}^{-2}$) e ε é a dissipação viscosa da energia cinética turbulenta ($\text{m}^2.\text{s}^{-3}$).

Os valores de k e ε podem ser obtidos a partir da equação diferencial de transporte da energia cinética turbulenta (Eq. 3.11) e da equação diferencial de transporte da taxa de dissipação viscosa específica (Eq. 3.12), respectivamente.

$$\rho \frac{\partial(\rho k)}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} k) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon \quad (3.11)$$

$$\rho \frac{\partial(\rho \varepsilon)}{\partial t} - \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \varepsilon) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \varepsilon) \quad (3.12)$$

onde P_k é a produção de turbulência devido às forças viscosas e de flutuabilidade ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-3}$), σ_k é uma constante igual 1,0, σ_ε é uma constante igual 1,3, $C_{\varepsilon 1}$ é uma constante igual a 1,44 e $C_{\varepsilon 2}$ é uma constante igual a 1,92.

Portanto, a fim de complementar o estudo, a formulação analítica torna-se importante pois tanto a performance térmica quanto o fluxo de ar se baseiam nas formulações descritas nesta seção.

3.5. Simulação numérica

Um projeto de fachada dupla apresenta restrições para simulação em programas de modelagem energética com relação à análise do fluxo de ar e do processo de transferência de calor na cavidade (MANZ; FRANK, 2005). Para modelar de forma mais confiável a transferência de calor entre as superfícies e o fluxo de ar mais complexo, a análise das simulações em CFD (Computational Fluid Dynamics – Dinâmica de Fluidos Computacional) torna-se uma alternativa.

A integração entre programas de simulação para o estudo do desempenho térmico de fachadas duplas é justificável e necessário. Manz e Frank (2005) 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. No primeiro nível, os autores atentam para as reflexões, absorções e transmissões que ocorrem em cada face das diferentes camadas da fachada dupla. O segundo nível trata da dinâmica dos fluidos de ar na cavidade e pelo ambiente. No último nível deve-se abordar o comportamento térmico do conjunto e a condução do calor através das superfícies.

Neste trabalho, a simulação numérica é feita utilizando-se o software ANSYS/CFX tendo como foco a análise do fluxo de ar e o processo de convecção de calor na cavidade da fachada dupla.

O software ANSYS permite a criação de protótipo virtuais completos de produtos ou sistemas complexos. A denominação CFX se trata de um software específico para tratar de problemas de dinâmica dos fluidos computacional com precisão, robustez e velocidade (ANSYS, 2016).

O desenvolvimento da solução do problema se dá desenhando o modelo físico (domínio computacional) ou inserindo-o a partir de outros softwares do tipo CAD por exemplo. Definido o protótipo é possível gerar uma malha que por sua vez divide o domínio computacional em unidades pequenas denominado células.

Após gerada uma malha de qualidade, as condições de contorno podem ser especificadas para face do domínio para simulações em 3D. O tipo de fluido também deve ser definido, onde no próprio programa se encontra o fluido com as respectivas propriedades.

De forma geral, o problema está pronto para a avaliação numérica e o programa realiza, por meio de iterações os cálculos necessários até o problema convergir. Uma solução gráfica também é gerada onde é possível observar o comportamento do fluido em questão.

3.5.1. Modelo simulado

O modelo simulado deste trabalho é concebido por meio da utilização do complemento “Geometry” presente no software “ANSYS CFX”. No caso, somente a face da construção em que se encontra a parede dupla é levado em conta conforme apresentado na

Figura 3.11.

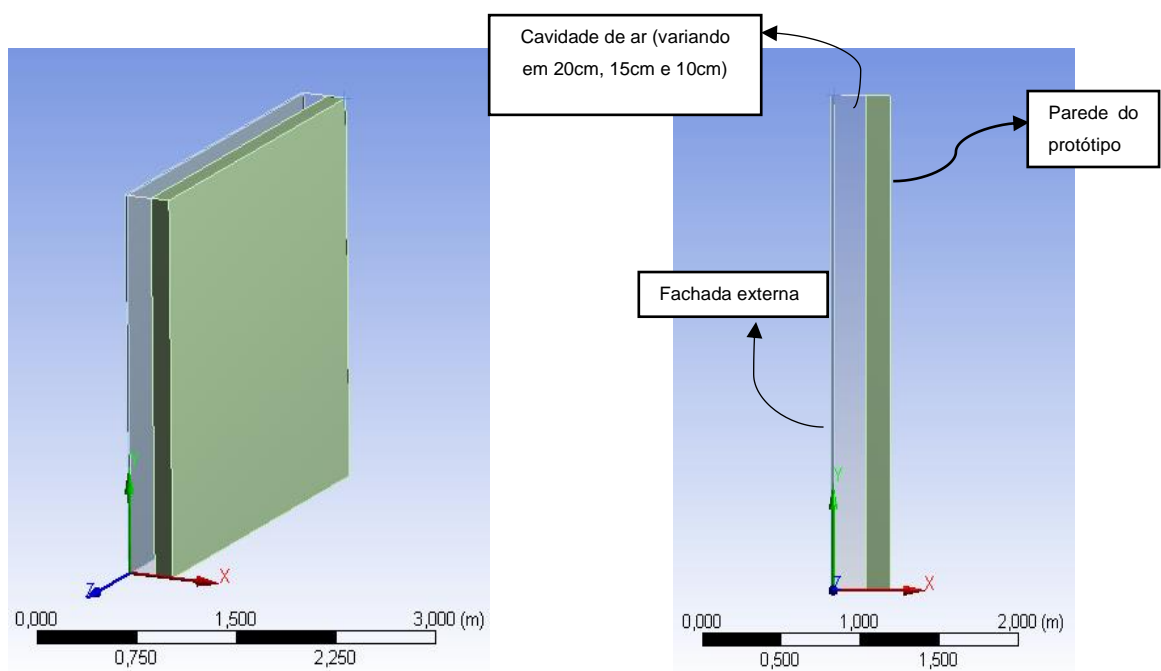


Figura 3.11 – Modelo simulado

Considerando as configurações de fachada dupla, três modelos são construídos variando a espessura da cavidade em 20 cm, 15 cm e 10 cm como na análise experimental. A partir de então torna-se possível a geração da malha.

3.5.2. Geração da malha

Devido à geometria simples do modelo, a malha gerada no complemento “Mesh” apresenta elementos hexaédricos. O modelo simulado com a malha gerada é apresentado na Figura 3.12.

Na Figura 3.12 percebe-se que a região da cavidade (ar) e a fachada externa, apresentam uma malha mais refinada em relação à parede de alvenaria. O refinamento se fez necessário para a região de fluido, uma vez que a avaliação do fluxo de ar e da transferência de calor desta região é de extrema importância na análise dos resultados. Já para a fachada externa, o refinamento se dá devido à sua pequena espessura de modo a observar a transferência de calor no plano transversal.

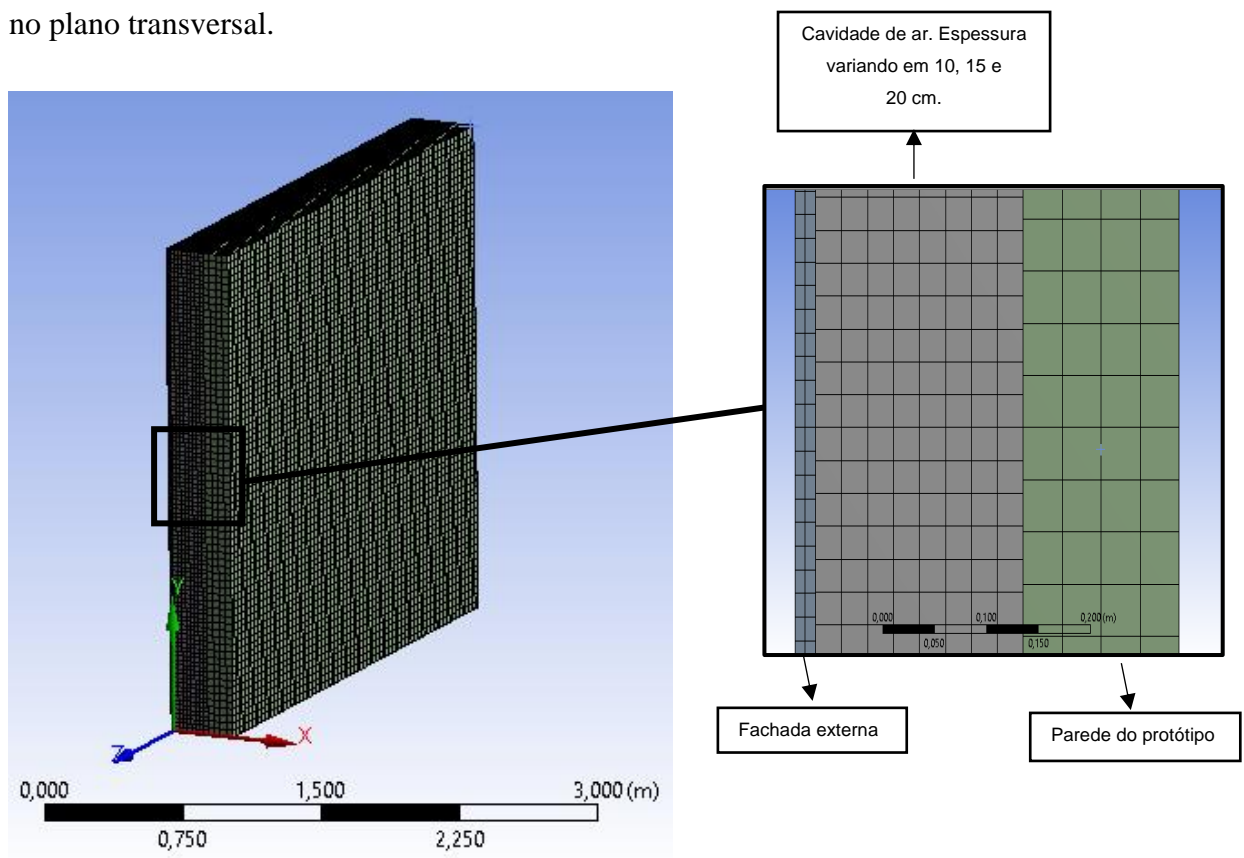


Figura 3.12 – Malha gerada do modelo

A obtenção das malhas finais se dá a partir da realização de testes de convergência onde consideram-se bons resultados obtidos no menor tempo computacional. Devido à dimensão do problema, não se exige um maior refinamento da malha.

Portanto, após obtenção das malhas finais, o software fornece uma estatística dos elementos. Sendo assim, a malha gerada possui o número de elementos e de nós para cada configuração de modelo simulado apresentado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Estatísticas das malhas dos modelos simulados

Espessura da cavidade	Número de elementos	Número de nós
20cm	136204	673599
15cm	151000	744953
10cm	224944	1079501

Destaca-se pelos dados apresentados na Tabela 3.2 que o número de elementos e consequentemente o número de nós aumenta à medida que diminui a espessura da cavidade. Isto se dá devido à necessidade de mais elementos hexaedros na direção transversal. Deste modo a espessura destes hexaedros tendem a diminuir ao diminuir a espessura da cavidade.

3.5.3. Definição das condições de contorno

As condições de contorno definidas no modelo numérico baseiam-se nos valores reais obtidos na abordagem experimental e são inseridas no complemento “CFX-Pré”. Sendo assim, a modelagem numérica permite uma análise detalhada do fluxo de ar na cavidade e da transferência de calor no protótipo como um todo, a partir da temperatura da face interna da fachada e da temperatura da face interna da parede do protótipo tornando viável a obtenção da velocidade de saída do vento assim como a temperatura na face externa da parede do protótipo.

Como apresentado na abordagem experimental, a variação das temperaturas obtidas por termopares de superfície posicionados em pontos distintos de uma mesma face é pequena, podendo-se adotar o valor médio destas temperaturas, portanto, para a abordagem numérica, os valores médios de temperatura obtidos na análise experimental são inseridos como condições de contorno para o modelo tridimensional.

Para a execução da modelagem, são feitas simulações considerando um intervalo de duas em duas horas para um período de um dia (24h) partindo de meia-noite, ou seja, 0h, 2h, 4h, 6h, 8h, 10h, 12h, 14h, 16h, 18h, 20h e 22h para as três espessuras de cavidade. Esta análise portanto, é em regime permanente para cada instante, podendo ainda ser denominado como pseudo-transiente (FORTUNA, 2000), sendo possível a obtenção dos resultados para cada horário do dia.

Por conseguinte, as condições de contorno do modelo são demonstradas no esquema mostrado na Figura 3.13, onde são configuradas a fachada externa, a cavidade (ar) e a parede de alvenaria de acordo com os materiais reais e suas propriedades. Percebe-se que as laterais da fachada externa são definidas como “parede” assim como as laterais da cavidade. Já para a parede do protótipo, as laterais são definidas como “simetria”.

Observa-se na Figura 3.13 as demais condições de contorno, sendo assim, a velocidade do vento na entrada da cavidade da fachada dupla assim como a temperatura do ar (temperatura ambiente) são definidas a partir dos dados medidos no protótipo e no caso representado pelas setas verticais (direção y) na abertura inferior. Ressalta-se a presença da condição de não deslizamento (velocidade = 0) no contato entre o ar e as superfícies.

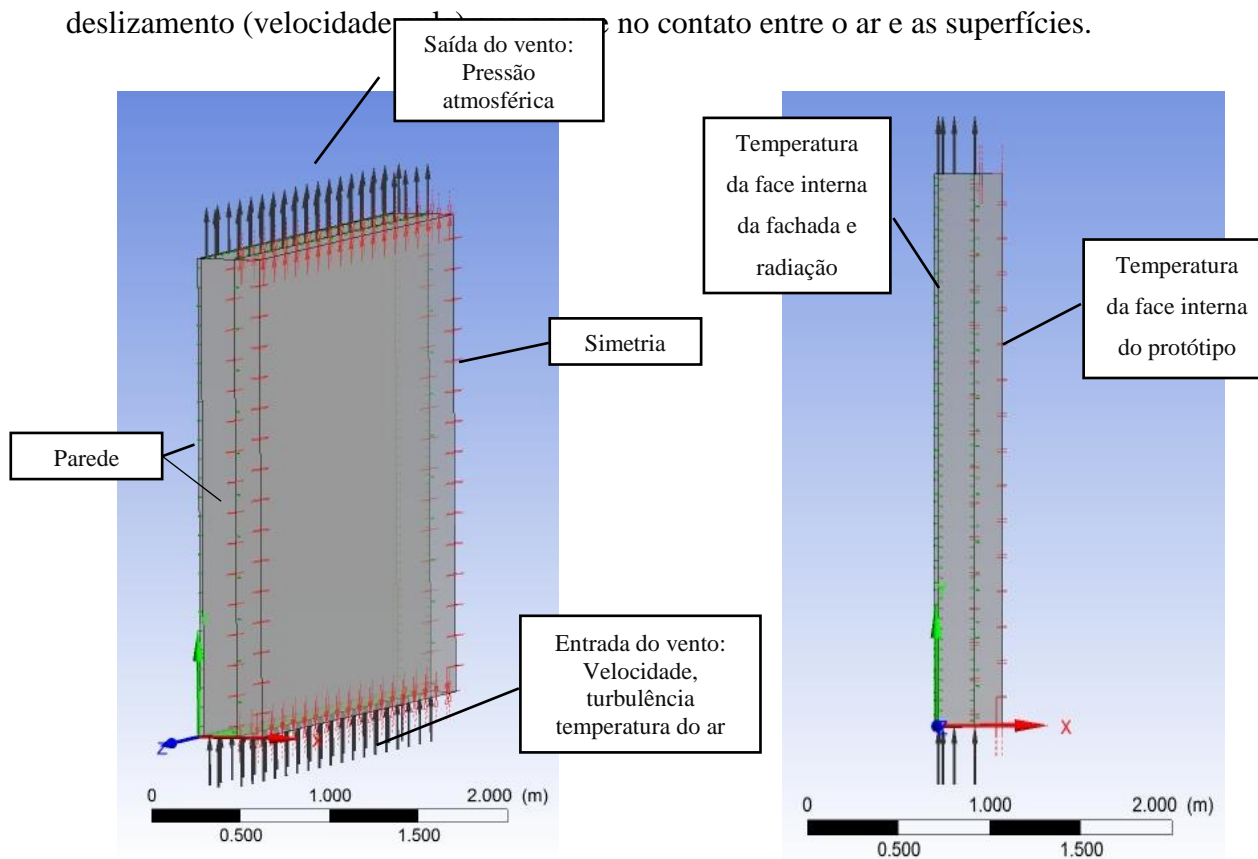


Figura 3.13 – Condições de contorno do modelo

Outra condição de contorno necessária para a entrada do vento é a turbulência que é definida com intensidade média (5%), sendo o modelo $k-\epsilon$ de turbulência aplicado ao fluido. A intensidade com valor médio (5%) é recomendada para fluxo em dispositivos não tão complexos como grandes tubos e fluxos de ventilação (ANSYS, 2013) que é o caso deste trabalho.

Para saída do vento, a condição de contorno é a pressão atmosférica e na Figura 3.13 é representada pelas setas verticais (direção y) na abertura superior.

Levando em consideração a parte sólida do modelo, as temperaturas da face interna da fachada e da face interna da parede do protótipo são inseridas no software a partir das temperaturas médias obtidas pelos termopares de superfície para cada horário definido. Os valores das condições de contorno empregados na simulação são apresentados no Apêndice A. Para o cálculo da radiação térmica entre as superfícies, o método estatístico de Monte Carlo é utilizado devido a sua simplicidade e precisão, na resolução da Equação de Stefan-Boltzmann.

Por fim, os controles de convergência definidos são o mínimo de 1 (uma) iteração e um máximo de 100 (cem) iterações por simulação de modo que foram feitas tentativas com maiores valores de iterações apresentado resultados similares ao valor máximo de 100 (cem) iterações. Destaca-se que foi adotado o menor número de iterações a partir do qual os resultados convergem a fim de reduzir o tempo computacional. Além disso, de acordo com ANSYS (2013), o critério de convergência recomendado é um valor igual ou inferior a 1×10^{-4} RMS (root mean square), de modo a obter resultados confiáveis, sendo assim, como critério de convergência, o valor RMS adotado foi de 1×10^{-4} . Os resultados da convergência para uma simulação é apresentado na Figura 3.14.

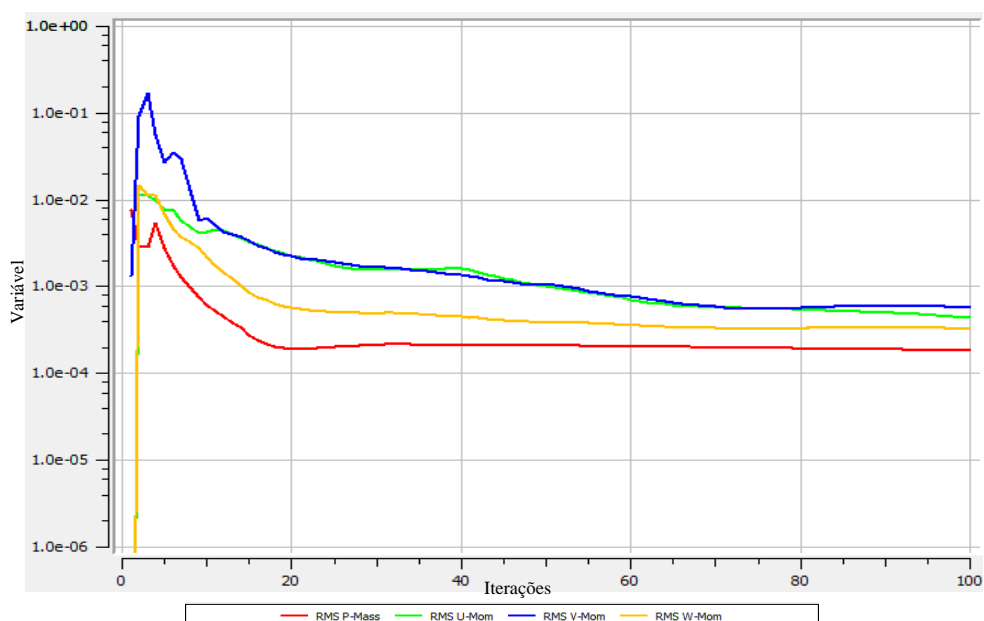


Figura 3.14 - Resultado da convergência

As curvas apresentadas na Figura 3.14 demonstram que os valores RMS para conservação da massa e momento ficaram abaixo de 1×10^{-4} como recomendado por ANSYS (2013). O tempo computacional para cada simulação foi de aproximadamente 15 minutos.

3.5.4. Aquisição dos dados do modelo numérico

A aquisição dos dados para o modelo numérico se dá a partir da inserção de planos e linhas em posições estratégicas no modelo simulado. As posições estratégicas são definidas como as extremidades além de posições centrais. Por meio do esquema apresentado na Figura 3.15 é possível perceber as posições de interesse para obtenção dos resultados.

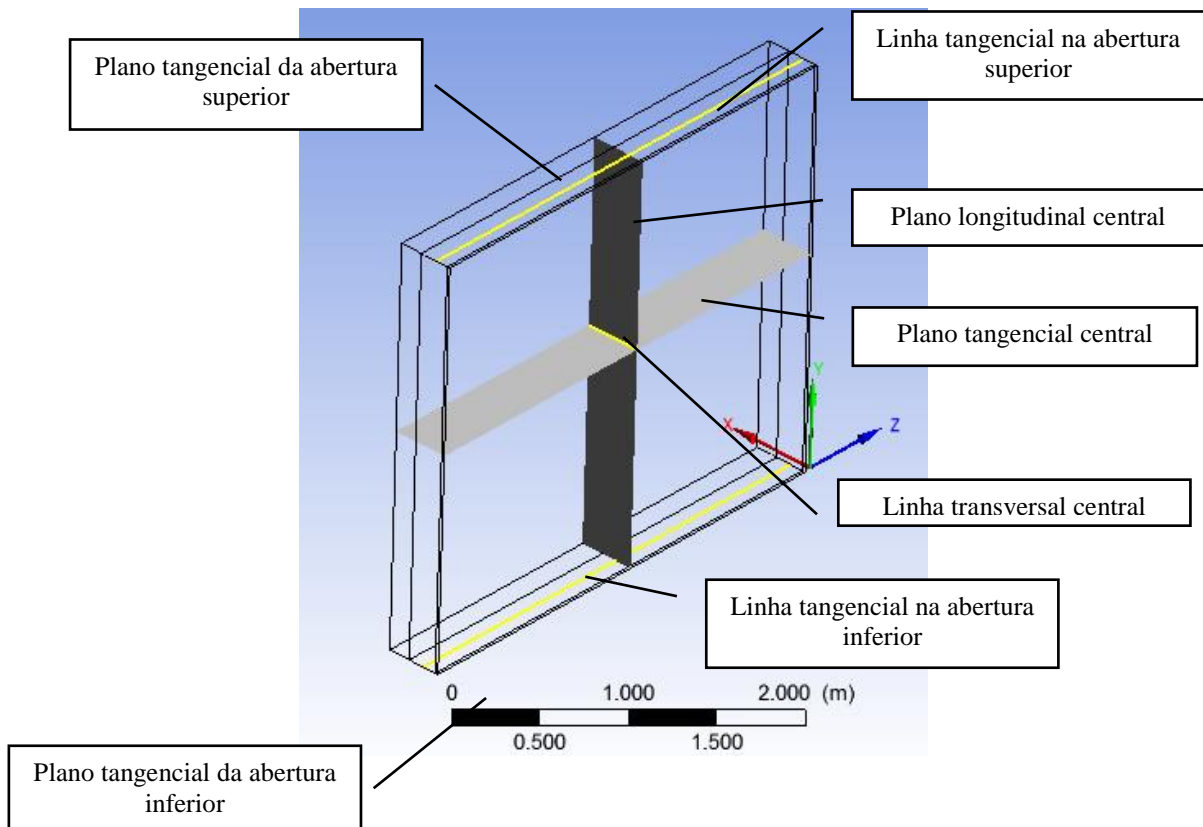


Figura 3.15 – Linhas e planos para obtenção dos resultados numéricos

4. RESULTADOS

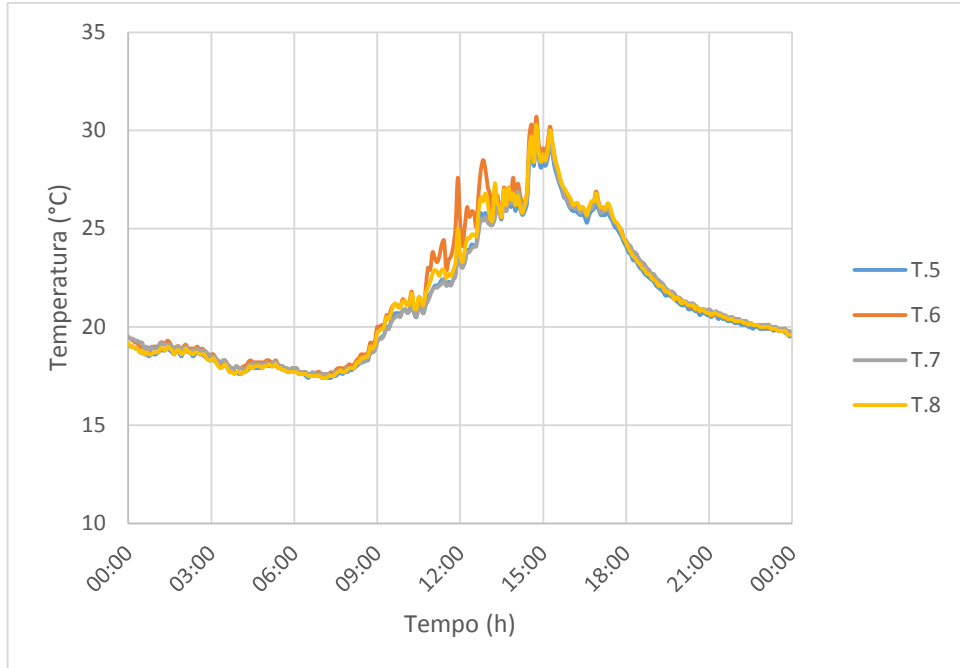
Os resultados obtidos a partir da coleta de dados são apresentados neste capítulo. Para melhor entendimento e análise, uma sequência de apresentação é descrita a seguir, seguindo inicialmente pela abordagem experimental e numérica:

- 1 – Apresentação das temperaturas dos termopares de superfície de cada face e de cada configuração da fachada.
- 2 – Apresentação dos dados combinados das temperaturas médias das fachadas além da temperatura do ambiente externo para cada configuração de fachada.
- 3 – Apresentação dos valores de velocidade do vento para cada configuração de fachada.
- 4 – Apresentação dos dados calculados a partir das medições.
- 5 – Verificação e apresentação dos resultados obtidos na análise numérica para cada configuração de fachada.

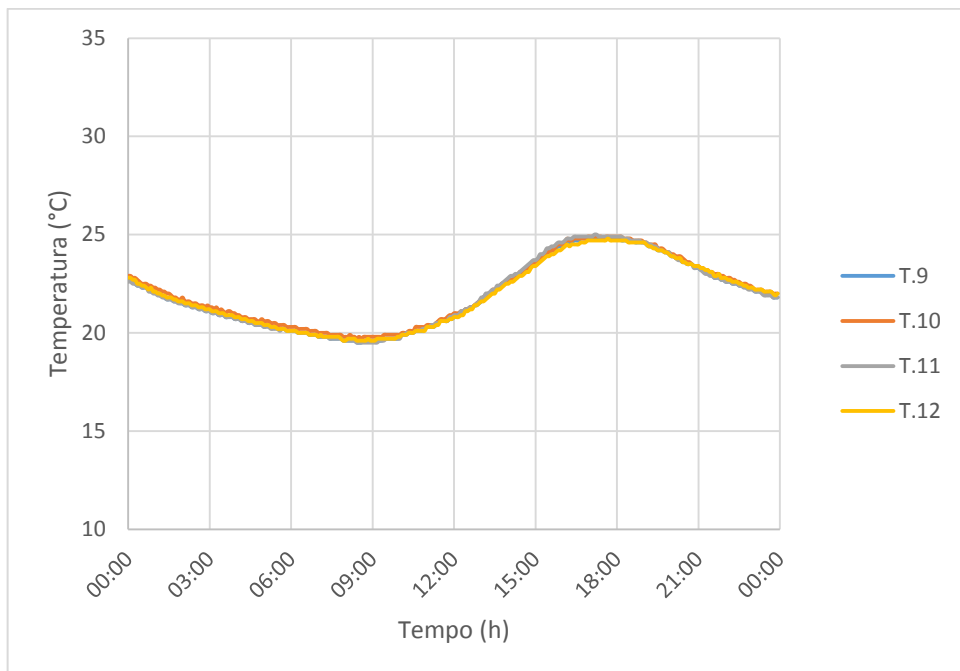
4.1. Resultados das medições

Os resultados relacionados com a abordagem experimental iniciam-se com a comparação da temperatura dos termopares posicionados em uma mesma face. Tal análise torna-se importante de modo a obter uma temperatura representativa para cada superfície.

A partir dos dados apresentados na Figura 4.1, Figura 4.2, Figura 4.3 e Figura 4.4 observa-se que não há uma grande variação entre as temperaturas dos termopares posicionados em uma mesma superfície. Ocorre uma pequena diferença, durante os horários de temperatura mais elevada somente na superfície interna da fachada e na face externa da parede do protótipo. A fachada recebe a incidência solar direta ocasionando uma maior troca de calor por radiação.

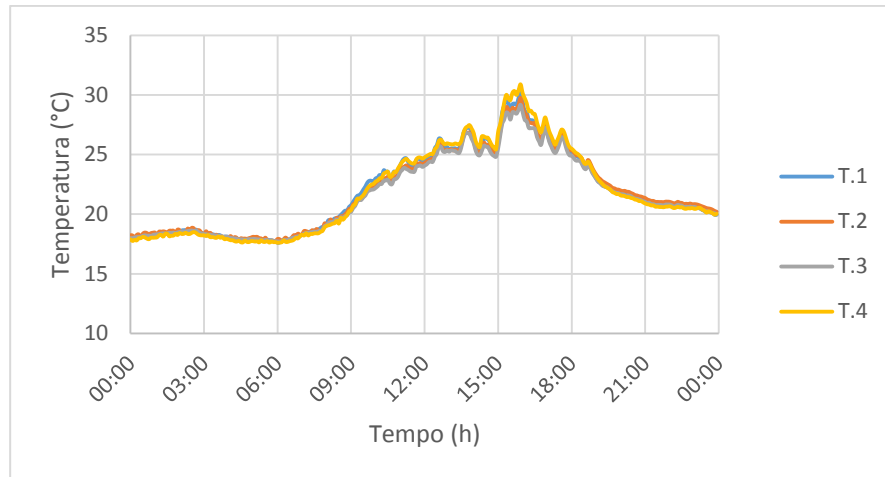


(a) Face externa da parede do protótipo

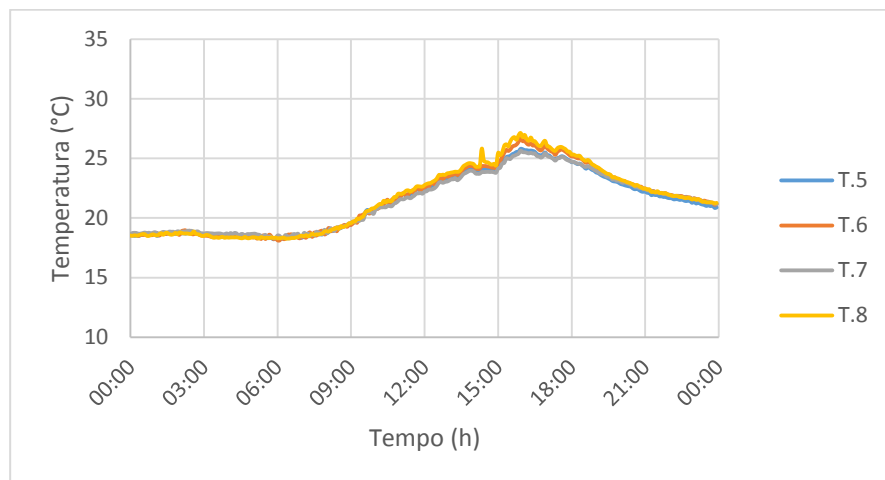


(b) Face interna da parede do protótipo

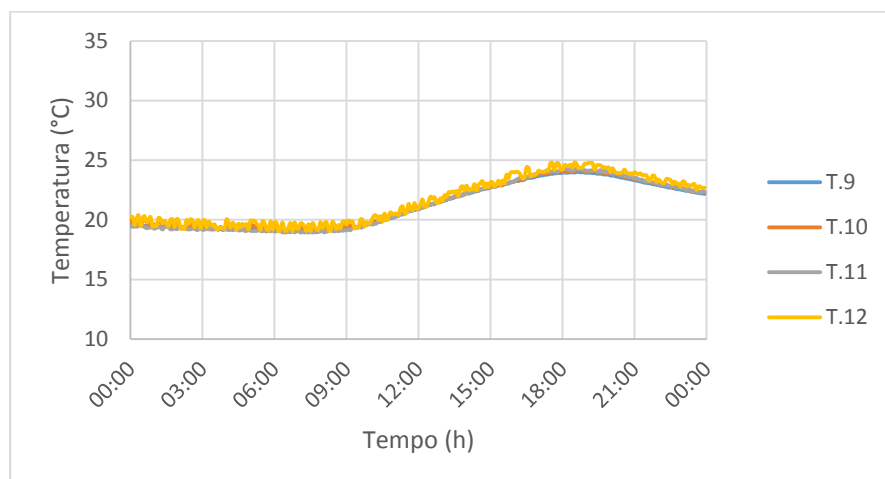
Figura 4.1 - Evolução temporal da temperatura por termopar para a ausência da fachada



(a) Face interna da fachada

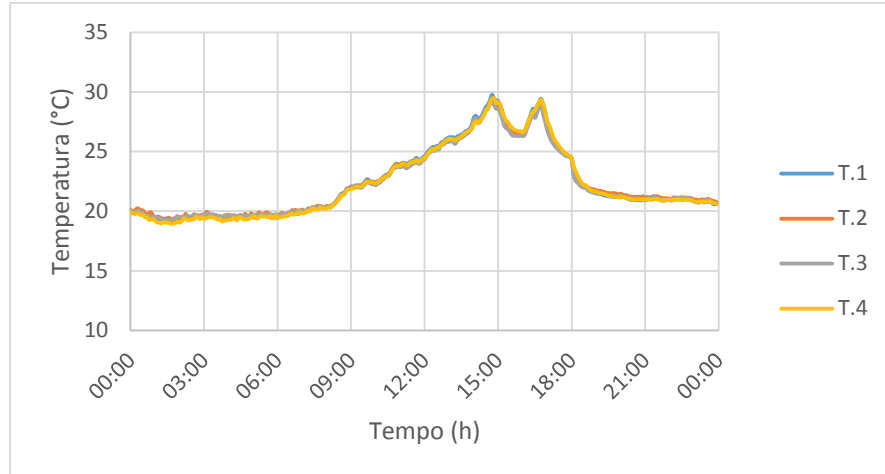


(b) Face externa da parede do protótipo

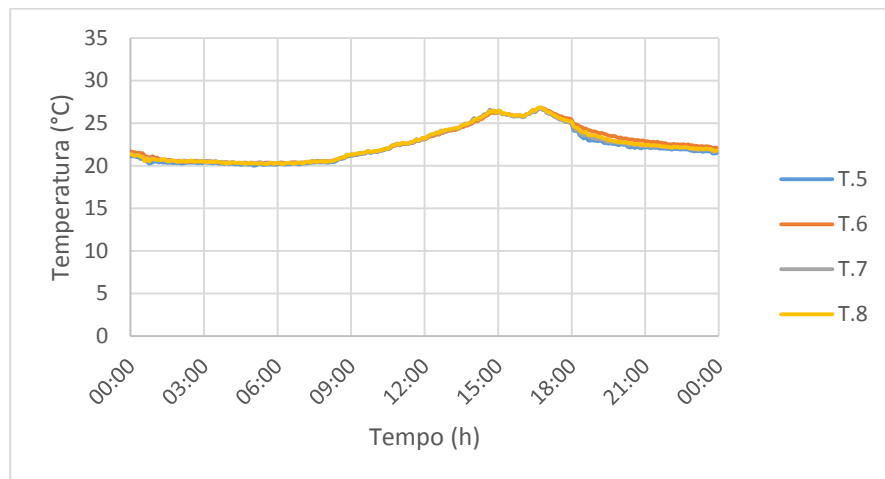


(c) Face interna da parede do protótipo

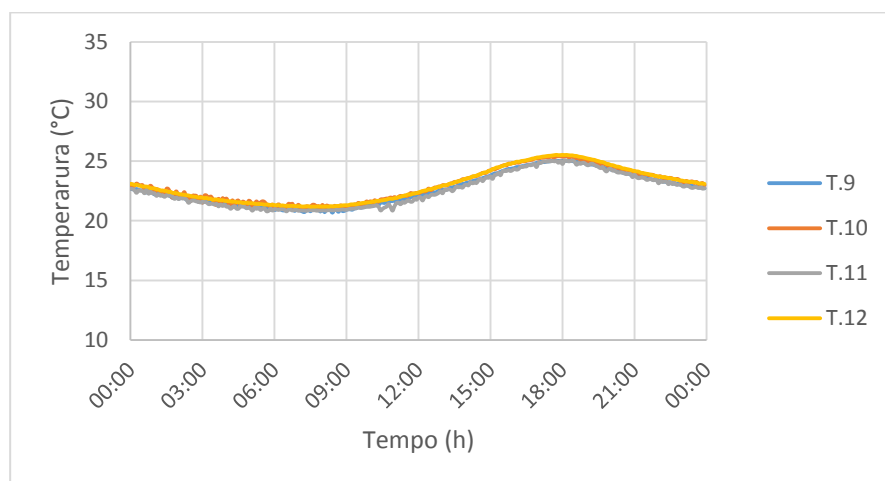
Figura 4.2- Evolução temporal da temperatura por termopar para cavidade em 20 cm



(a) Face interna da fachada

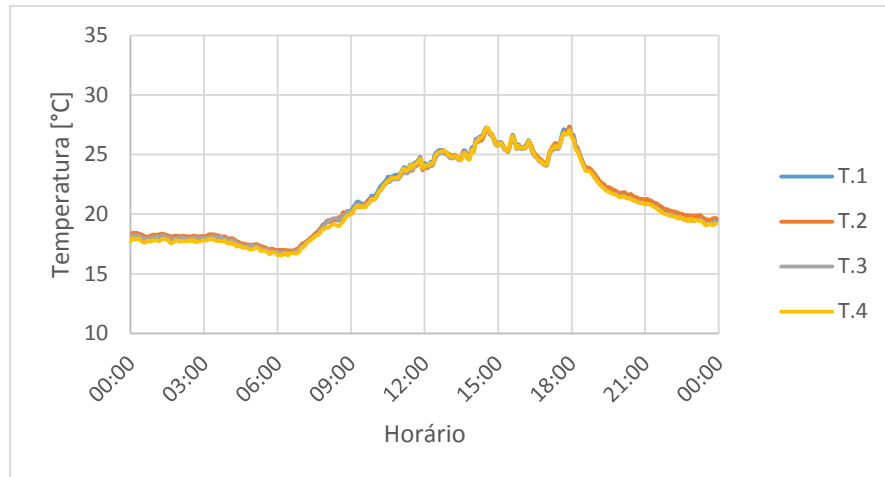


(b) Face externa da parede do protótipo

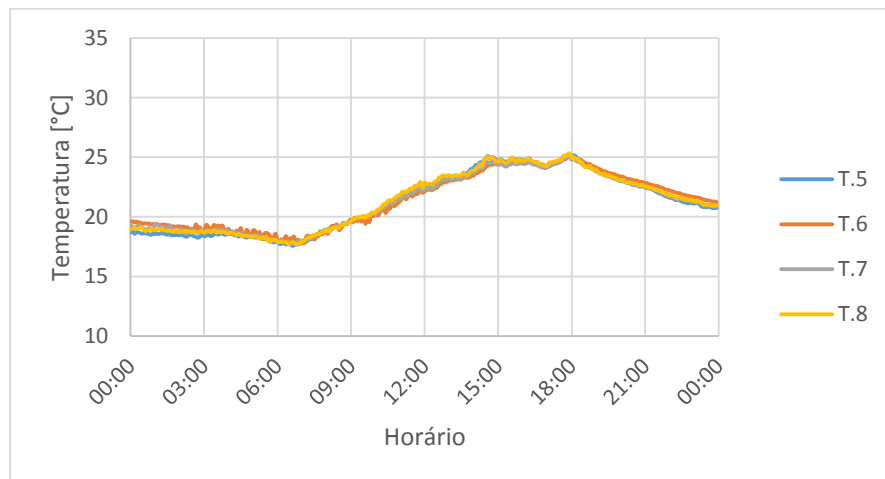


(c) Face interna da parede do protótipo

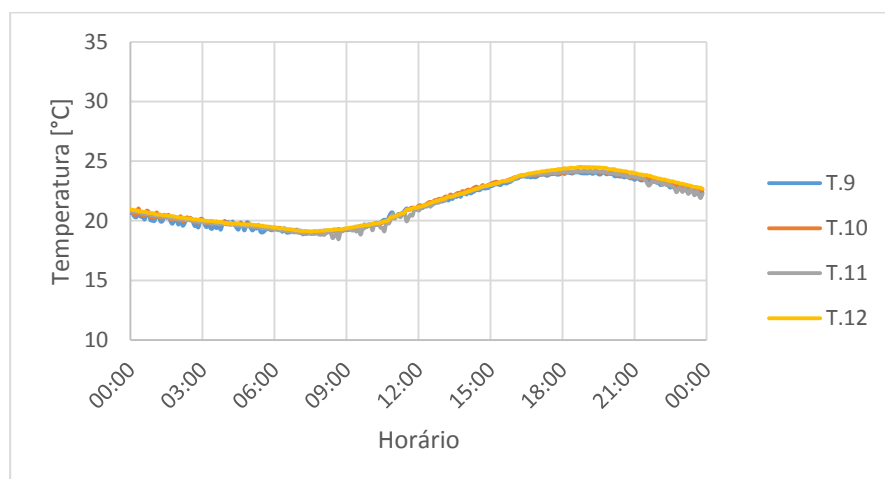
Figura 4.3 - Evolução temporal da temperatura por termopar para cavidade em 15 cm



(a) Face interna da fachada



(b) Face externa da parede do protótipo



(c) Face interna da parede do protótipo

Figura 4.4 - Evolução temporal da temperatura por termopar para cavidade em 10 cm

Na Tabela 4.1 apresenta-se o desvio padrão médio para cada face de cada configuração da cavidade.

Tabela 4.1 - Desvio padrão médio para as configurações da fachada dupla

Posição	Desvio padrão médio [°C] por espessura da cavidade			
	Sem fachada	20 cm	15 cm	10 cm
Face interna da fachada	-	0,24	0,15	0,14
Face externa da parede	0,26	0,25	0,17	0,20
Face interna da parede	0,10	0,21	0,24	0,19

Como mostrado na Tabela 4.1, os valores de temperatura nos pontos de medição são próximos, apresentando um desvio padrão médio com valor máximo de 0,26 °C para a face externa da parede na configuração sem a fachada externa. A partir desta observação é possível considerar para as demais análises a média de temperatura entre os termopares de cada face. Como exemplo, as curvas mostradas na Figura 4.5 apresentam as temperaturas médias para a face interna da fachada, face externa e interna da parede considerando-se a cavidade em 20 cm.

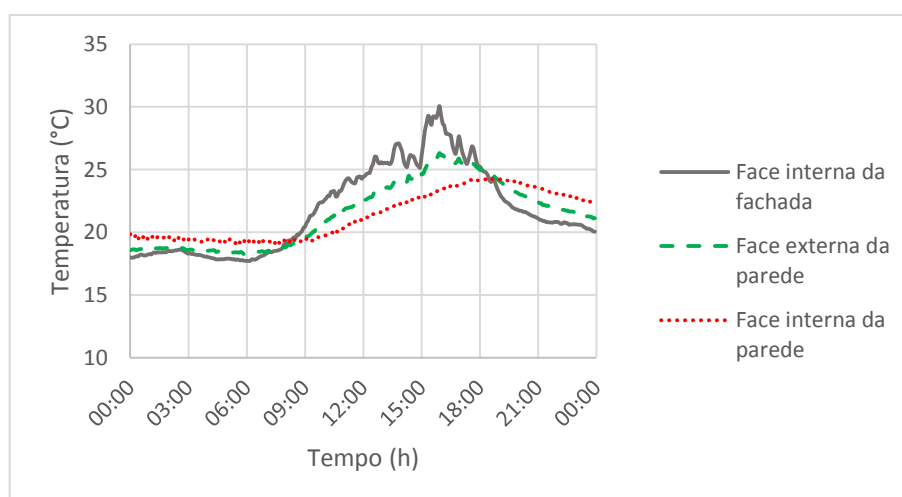
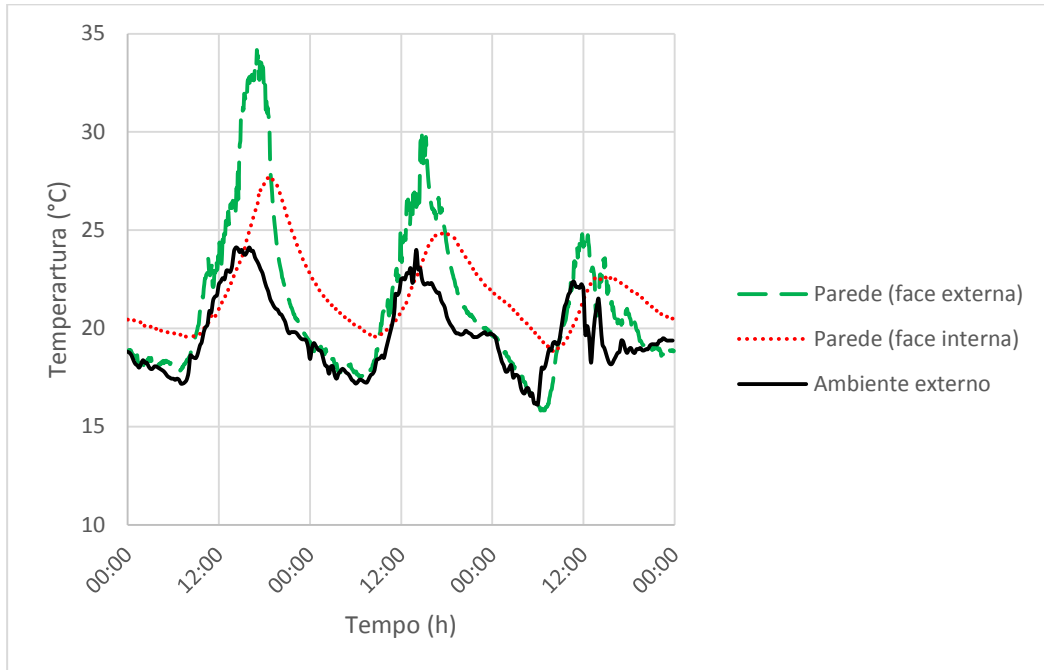


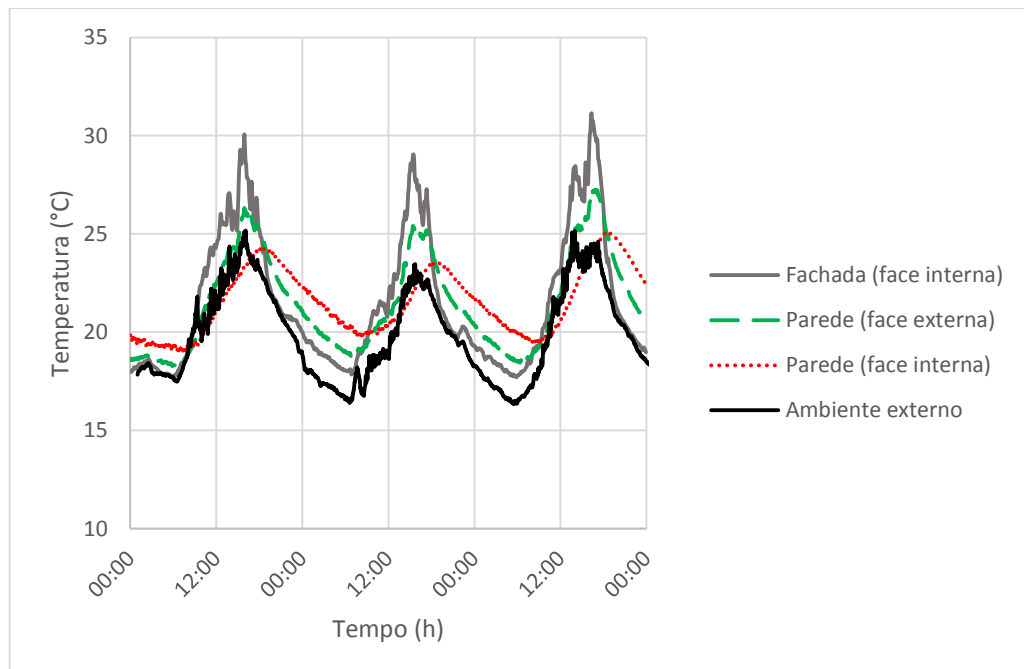
Figura 4.5 - Evolução temporal de temperatura média para a espessura da cavidade de ar em 20 cm

Tomando as médias de temperatura de cada face para as quatro configurações de espaçamento da cavidade (sem fachada, 20cm, 15cm e 10cm), obtém-se os perfis de temperatura para três dias consecutivos (72 horas) conforme apresentado na Figura 4.6. É importante destacar o fato de que dados de uma configuração são coletados em intervalos de dias diferentes, portanto

condições climáticas diferentes, tornando inviável apresentação de curvas de configurações distintas num mesmo gráfico.

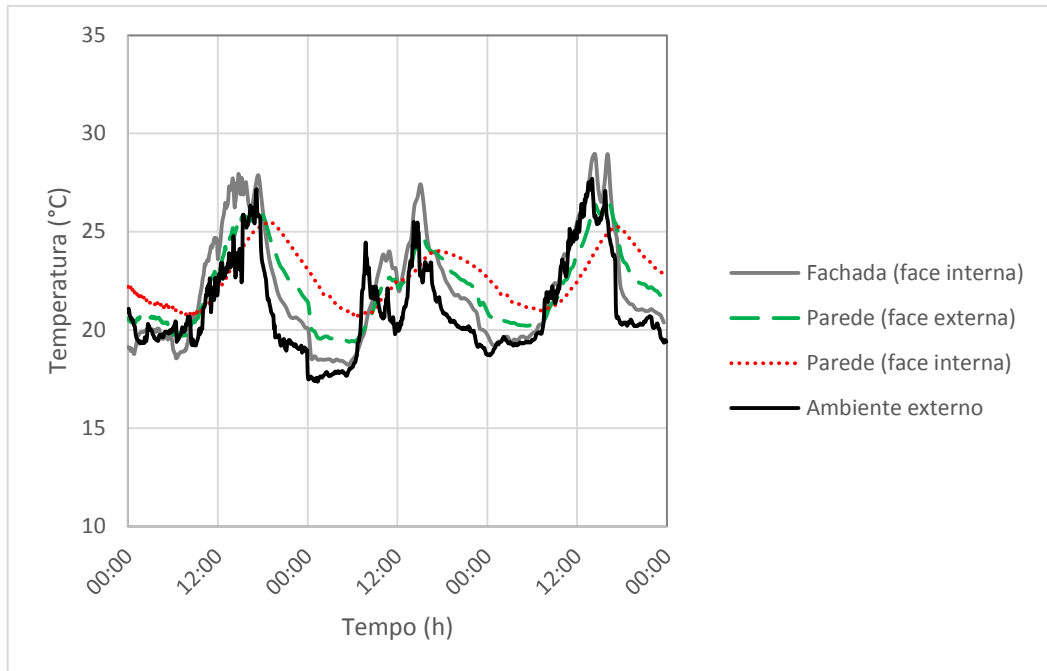


(a) Sem fachada

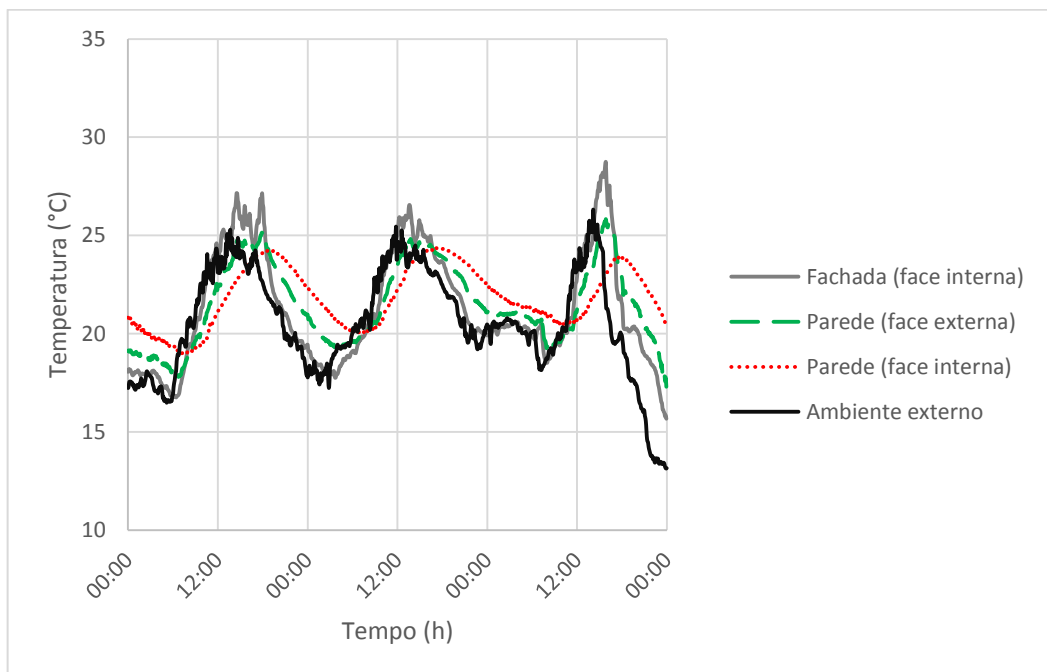


(b) Cavidade em 20 cm

Figura 4.6 – Evolução temporal de temperatura



(c) Cavidade em 15 cm



(d) Cavidade em 10 cm

Figura 4.6 – Evolução temporal de temperatura

Observa-se por meio das curvas apresentadas na Figura 4.6 que os picos de temperaturas ocorrem no período da tarde, por volta das 16h e que as curvas da configuração sem fachada (Figura 4.6(a)) evidenciam a radiação solar direta na face externa do protótipo, o que provoca um maior aquecimento no interior do protótipo, comprovando-se a eficácia da fachada dupla.

Percebe-se também, um atraso térmico mais evidenciado na temperatura da face interna da parede do protótipo. Isto é mais evidente na parede, uma vez que ela é mais espessa e deste modo tem maior capacitância térmica.

Para a velocidade do vento, os resultados medidos na entrada da cavidade e na saída são apresentados na Tabela 4.2 por meio da média global dos valores coletados de acordo com a metodologia descrita no item 3.1. Ressalta-se que não foi encontrada uma relação entre a velocidade do vento e o horário do dia, tendo uma alta variação nos resultados obtidos, que é percebido pelo desvio padrão médio.

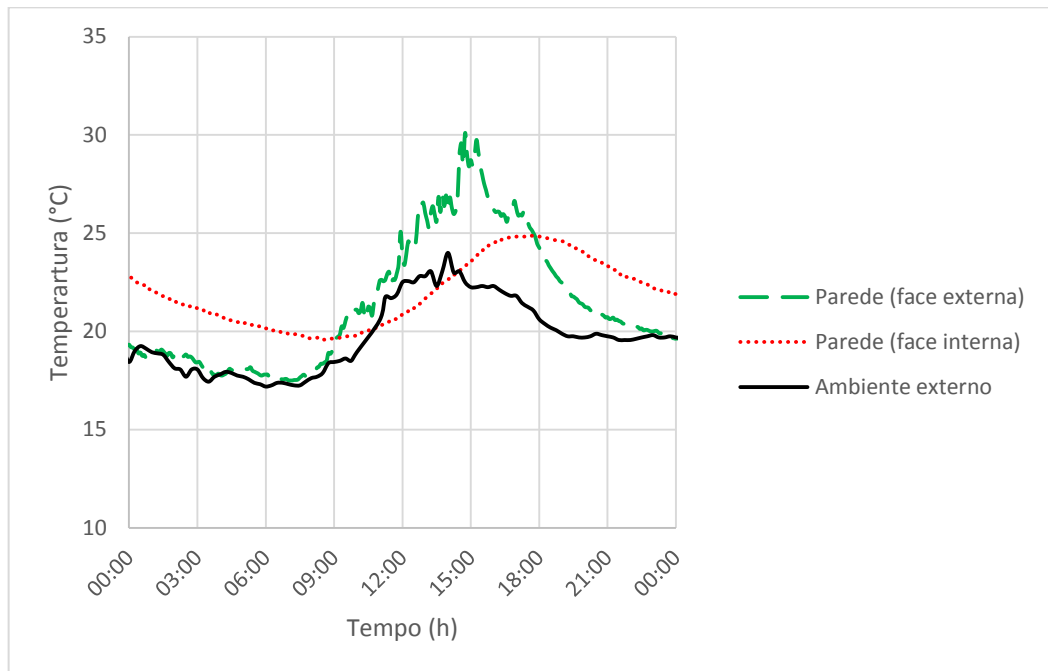
Tabela 4.2 – Velocidade média de entrada e saída do vento na cavidade

Espessura da cavidade (m)	Velocidade média de entrada do vento (m/s)	Desvio padrão médio da velocidade de entrada do vento (m/s)	Velocidade média de saída do vento (m/s)	Desvio padrão médio da velocidade de saída do vento (m/s)
0,020	0,15	0,05	0,28	0,11
0,015	0,20	0,09	0,29	0,12
0,010	0,29	0,07	0,35	0,12

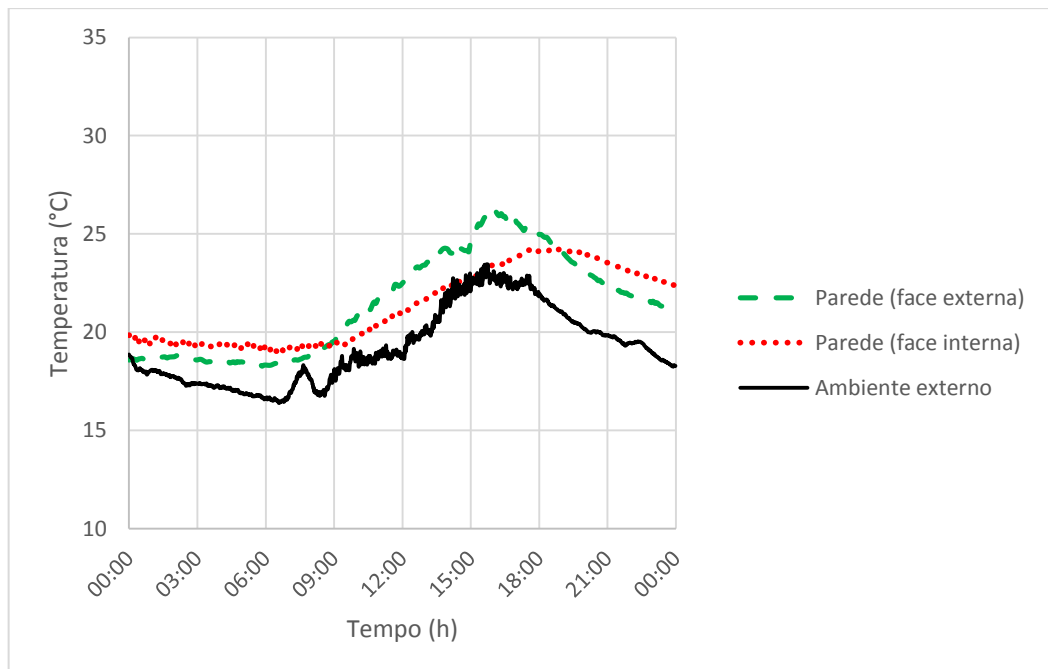
Por meio dos resultados mostrados na Figura 4.6 nota-se que com o aumento da espessura da cavidade, a diferença de temperatura da face interna da fachada e da face externa da parede é maior para o período diurno. No entanto, observando os dados na Figura 4.6(b) que representa a condição de cavidade com maior espessura, percebe-se que tais temperaturas são maiores que a temperatura do ambiente externo, diferentemente do que ocorre com as espessuras de cavidade em 15 cm e 10 cm (Figura 4.6(c) e Figura 4.6(d)). Tal fato pode ser explicado pelo aumento da velocidade para espessuras menores (Tabela 4.2) que contribui com a remoção do calor das faces da cavidade, que estão em contato com ar.

A fim de se obter uma análise mais detalhada, apresenta-se na Figura 4.7 a evolução temporal de temperatura das faces externa e interna da parede e da temperatura ambiente em um período de 24 h para o caso sem fachada externa e com fachada externa para todas as espessuras de cavidade. Percebe-se que para a cavidade em 20 cm (Figura 4.7(b)), esta condição se torna menos eficiente que as demais, de modo que os resultados se aproximam da condição sem a fachada (Figura 4.7(a)), uma vez que para os dois casos as temperaturas das faces interna e externa da parede do protótipo apresentam valores maiores que a temperatura do ambiente. Tal fato implica que quanto maior a temperatura da face externa da parede,

maior a temperatura da face interna da parede devido ao fenômeno da condução, implicando diretamente na temperatura do ambiente interior.

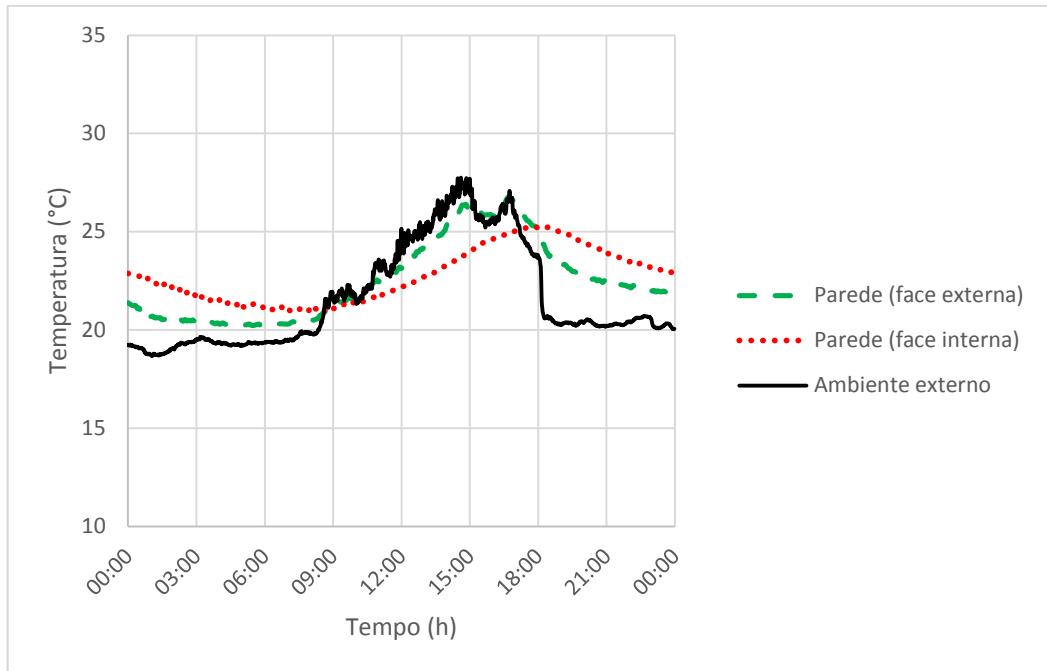


(a) Sem fachada

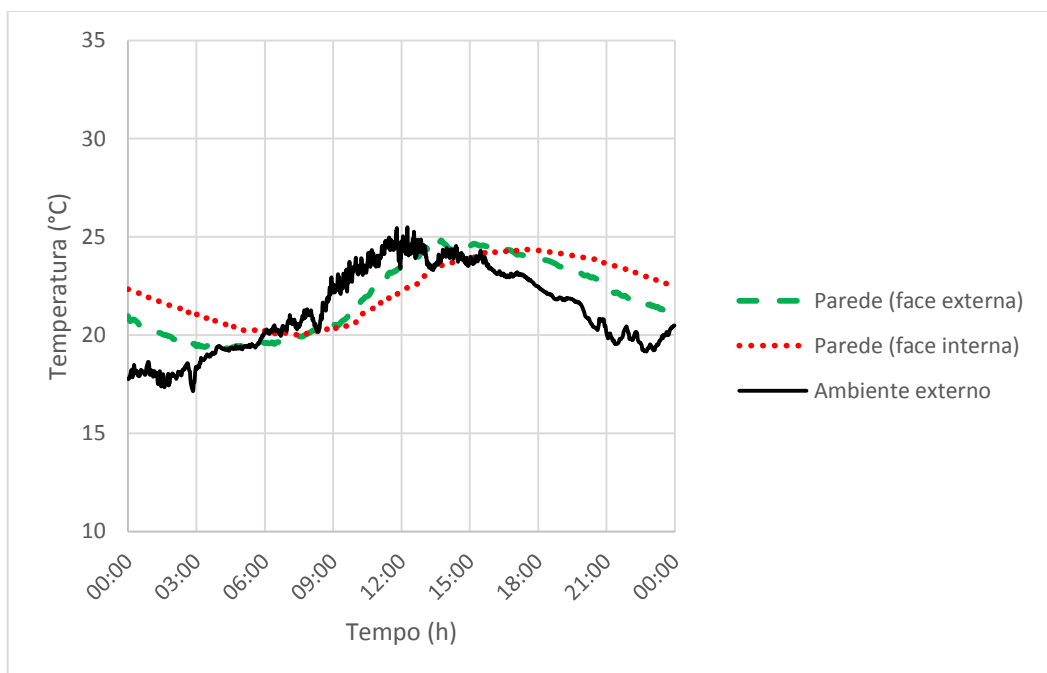


(b) Cavidade em 20 cm

Figura 4.7 - Evolução temporal de temperatura durante um dia



(c) Cavidade em 15 cm



(d) Cavidade em 10 cm

Figura 4.7 - Evolução temporal de temperatura durante um dia

Tais observações podem ser confirmadas por meio dos dados apresentados na Tabela 4.3 que apresenta os valores médios das diferenças de temperatura ao longo de três dias consecutivos considerando-se o período diurno (entre 07:00h até às 18:00h) para as três configurações de cavidade e sem a fachada.

Tabela 4.3 - Valores médios das diferenças de temperaturas para o período diurno

Configuração da fachada externa	Valor médio das diferenças de temperatura entre a face interna da fachada e a face externa da parede do protótipo. (°C)	Valor médio das diferenças de temperatura entre a temperatura ambiente e a face interna da parede do protótipo. (°C)
Sem fachada	-	-0,8
20 cm	2,2	0,2
15 cm	0,8	0,6
10 cm	0,7	0,7

Observando-se os resultados mostrados na segunda coluna da Tabela 4.3, que apresenta as médias referentes às diferenças de temperaturas entre a face interna da fachada e da face externa da parede, percebe-se que para a espessura da cavidade em 20 cm, o valor médio é maior que os demais, o que significa que há uma maior diferença de temperatura entre estas faces. Em relação aos resultados apresentados na terceira coluna, que apresenta as médias referentes às diferenças de temperatura do ambiente externo e da face interna da parede do protótipo, observa-se que a disposição sem cavidade apresenta o menor valor médio seguido pela espessura da cavidade em 20 cm, sendo que o valor negativo da configuração sem fachada indica que a temperatura no interior do protótipo é maior que a temperatura externa. Percebe-se, que para este caso, quanto menor a espessura da cavidade, maior é a média da diferença, sendo assim, é possível afirmar que a temperatura no interior no protótipo é menor que a temperatura externa para todas as situações com fachada, sendo a configuração da cavidade em 10 cm a mais eficiente e que mais contribui com o conforto térmico no interior do protótipo.

4.2. Tipo de convecção

Considerando todos os fenômenos de transferência de calor presentes em uma fachada dupla, a convecção se mostra com uma maior complexidade sendo importante a observação do seu comportamento. Como afirmado por Manz, Schaelin e Simmler (2004), neste tipo de dispositivo a convecção combinada pode ocorrer, e portanto é feita uma análise da convecção para cada espessura de cavidade.

Selecionando os dados em um período de 24 horas, considerando as configurações de fachada em 20 cm, 15 cm e 10 cm, os resultados são apresentados na Figura 4.8 e na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

A análise do número Richardson se dá de modo que para $R_i \ll 1$, a convecção natural é desprezível, já para $R_i \gg 1$, a convecção forçada é desprezível, enquanto que para $R_i = 1$, a convecção combinada ocorre.

Observando os dados apresentados na Figura 4.8 (Apêndice B), percebe-se que para a cavidade em 20 cm os valores de R_i são maiores, apresentando um valor médio de 4,09. Já para a cavidade em 15 cm e 10 cm, os valores médios são 2,06 e 1,16, respectivamente. Percebe-se que há uma diminuição do número de R_i a medida que a espessura da cavidade diminui, no entanto os valores são próximos de 1 o que indica a ocorrência da convecção combinada.

A partir dos valores médios, nota-se que o aumento da espessura da cavidade tende a ocorrência da convecção natural, enquanto que a aproximação da fachada junto a parede tende a convecção forçada.

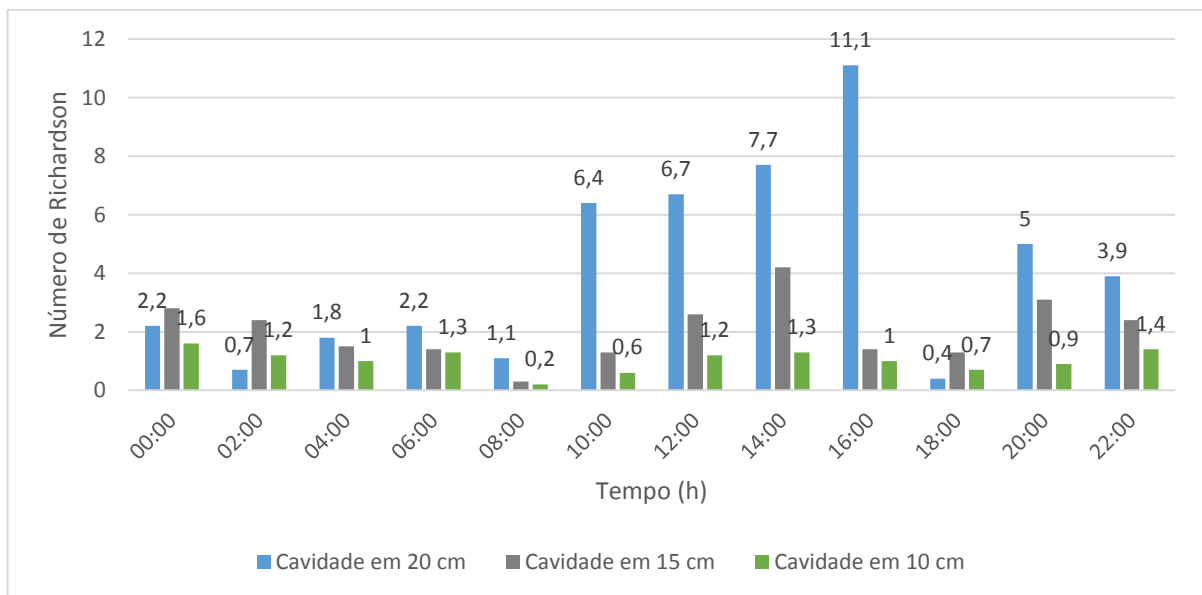


Figura 4.8 – Número de Richardson

4.3. Simulação numérica

A simulação numérica possibilita uma análise mais detalhada do funcionamento de uma fachada dupla. Apresenta-se nesta seção os resultados obtidos numericamente, o que engloba um detalhamento da transferência de calor por condução na parede do protótipo e um detalhamento da movimentação do ar ao entrar na cavidade.

4.3.1. Verificação do modelo numérico

Para verificação do modelo numérico, os resultados obtidos numericamente são confrontados com os resultados experimentais para as espessuras de cavidade em 20 cm, 15 cm e 10 cm.

Na Figura 4.9 são representadas as curvas que representam a evolução temporal da temperatura para a cavidade em 20 cm. Percebe-se que a curva de temperatura da face externa da parede do protótipo apresenta uma maior diferença entre o resultado experimental e o numérico, porém é notável que há uma boa concordância entre os valores numéricos e experimentais.

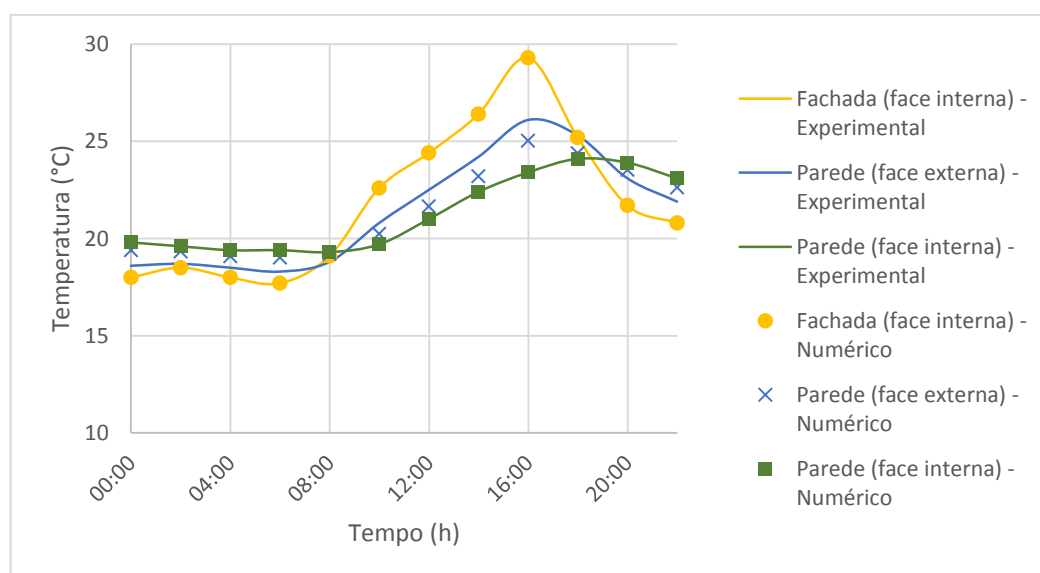


Figura 4.9 – Evolução temporal de temperatura para cavidade em 20 cm

De mesmo modo, para a cavidade em 15 cm os resultados são apresentados na Figura 4.10. Percebe-se que o resultado experimental e numérico também apresenta uma boa concordância, sendo que a curva de temperatura da face externa da parede do protótipo do

modelo numérico está mais próxima do modelo experimental ao comparar com os resultados da cavidade em 20 cm.

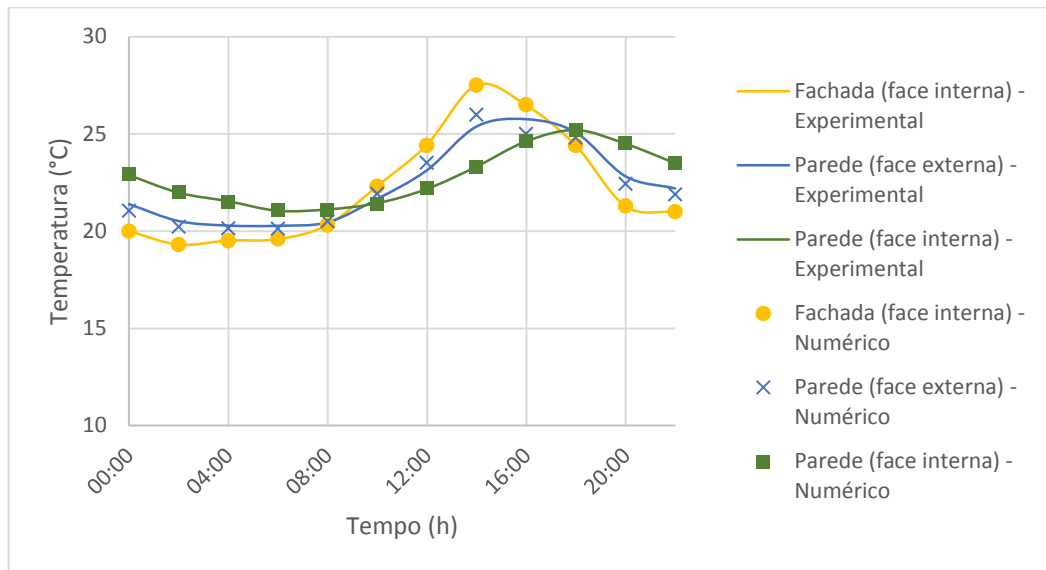


Figura 4.10 - Evolução temporal de temperatura para cavidade em 15 cm

Assim como em 20 cm e 15 cm, os resultados para a cavidade em 10 cm são apresentados na Figura 4.11 e também apresentam uma boa concordância.

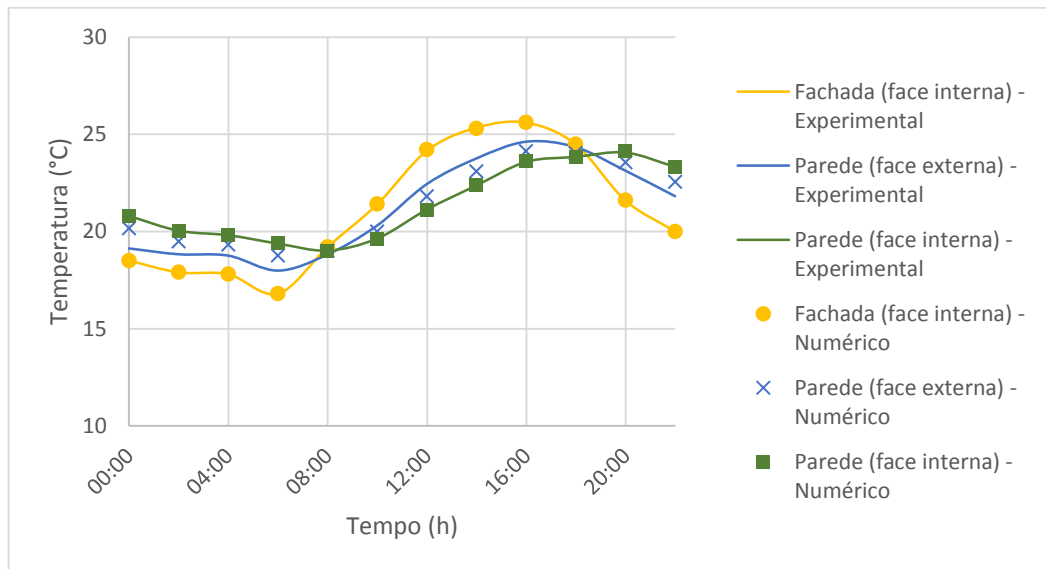


Figura 4.11 - Evolução temporal de temperatura para cavidade em 10 cm

A fim de verificar a diferença entre os valores da curva experimental e numérica para todas as configurações de espaçamento da cavidade, apresenta-se na Tabela 4.4 o erro relativo, ou seja, a diferença entre o valor experimental e numérico dividido pelo valor experimental e então

transformado em porcentagem. Os valores apresentados na Tabela 4.4 referem-se às médias dos erros relativos ao longo do dia. É apresentado também o desvio padrão relacionado.

Tabela 4.4 – Erros relativos referente aos resultados experimentais e numéricos

Espessura da cavidade	Face interna da fachada		Face externa da parede do protótipo		Face externa da parede do protótipo	
	Erro relativo (%) (valor médio)	Desvio padrão (%)	Erro relativo (%) (valor médio)	Desvio padrão (%)	Erro relativo (%) (valor médio)	Desvio padrão (%)
20 cm	0,1	0,1	3,4	0,8	0,1	0,1
15 cm	0,1	0,1	1,4	0,7	0,1	0,1
10 cm	0,1	0,1	2,7	1,3	0,1	0,1

Percebe-se por meio dos dados apresentados na Tabela 4.4 que os maiores erros relativos para todas as espessuras de cavidade são aqueles da face externa da parede do protótipo. Percebe-se também que as demais faces apresentaram um erro muito pequeno igual a 0,1%. De todo modo, os valores médios do erro relativo são baixos, o que permite a utilização do modelo numérico.

4.3.2. Análise numérica para cavidade em 20 cm

A análise dos resultados parte da observação do comportamento da transferência de calor da fachada dupla e da análise do fluxo de ar na cavidade. Para a cavidade em 20 cm, a variação temporal da transferência de calor é apresentada na Figura 4.12 e percebe-se que são apresentados os gradientes de temperatura entre face externa da fachada, a cavidade de ar e a parede do protótipo por meio do plano longitudinal central.

De acordo com o esquema mostrado na Figura 4.12 a escala foi mantida fixa para o período de um dia baseada nas temperaturas mínimas e máximas considerando todas as faces. A temperatura do ambiente externo também é inserida para cada horário determinado. Deste modo, é possível observar uma evolução da transferência de calor ao longo do dia tomando intervalos de duas em duas horas.

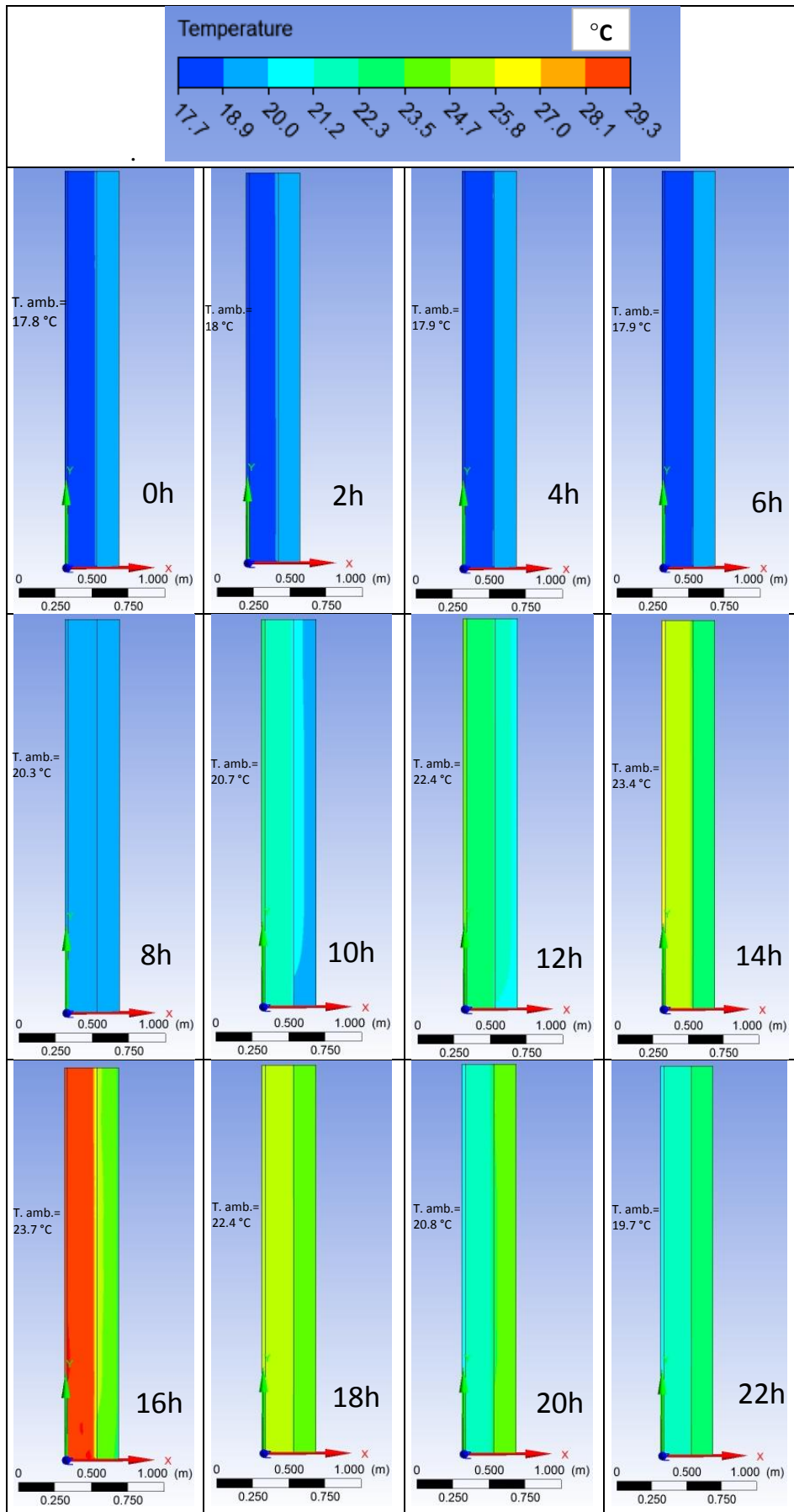


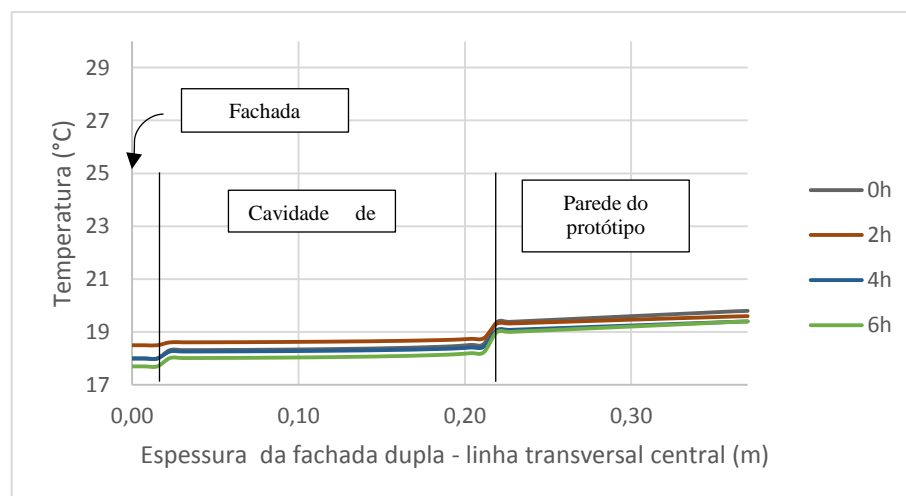
Figura 4.12 – Variação temporal da temperatura para uma fachada dupla (cavidade em 20 cm)

Por meio do esquema apresentado na Figura 4.12 é possível observar que o aquecimento da fachada inicia-se às 8h atingindo o valor máximo às 16h implicando no aumento gradual da temperatura na face interna da parede do protótipo. Com o fim do período solar (após 18h), a temperatura da fachada começa a cair, porém mais rapidamente do que a temperatura da face interna do protótipo. Tal fato pode ser explicado pelo material e espessura da parede do protótipo que propicia uma menor variação de temperatura quando comparado à fachada externa em função de sua maior capacitância térmica.

A partir da modelagem numérica é possível perceber os métodos de transferência de calor presentes em uma fachada dupla. Portanto, a fachada recebe insolação direta em sua face externa ocorrendo uma condução de calor para a fachada interna. Entre a face interna da fachada e a face externa da parede do protótipo ocorre a radiação e a convecção que é favorecida pela entrada de ar na abertura inferior da cavidade. Por fim ocorre novamente o fenômeno da condução entre a face externa da parede do protótipo e sua face interna.

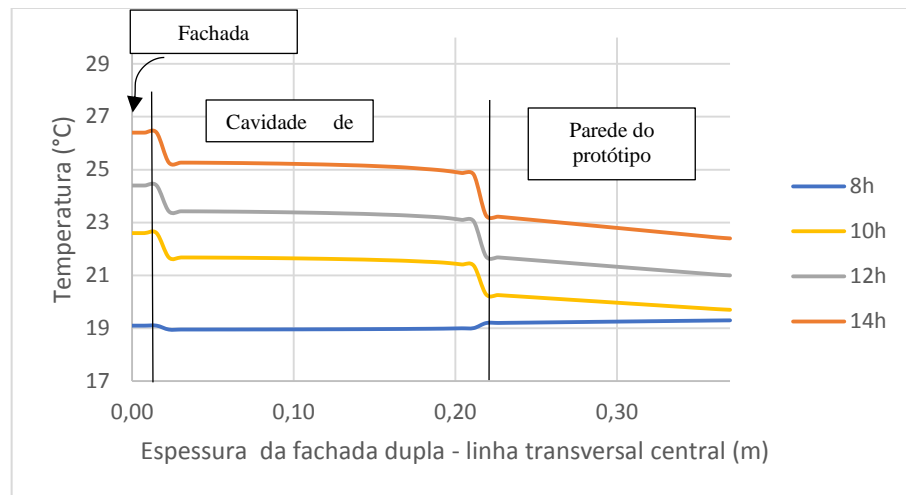
Deste modo, percebe-se que o fluxo de calor durante o período diurno (entre aproximadamente 6h e 18h) se dá do ambiente externo para o ambiente interno e durante o período noturno este fluxo passa a ser do ambiente interno para o externo.

Os gráficos apresentados na Figura 4.13 demonstram a evolução da temperatura ao longo da espessura da parede dupla para a linha transversal central na fachada dupla.

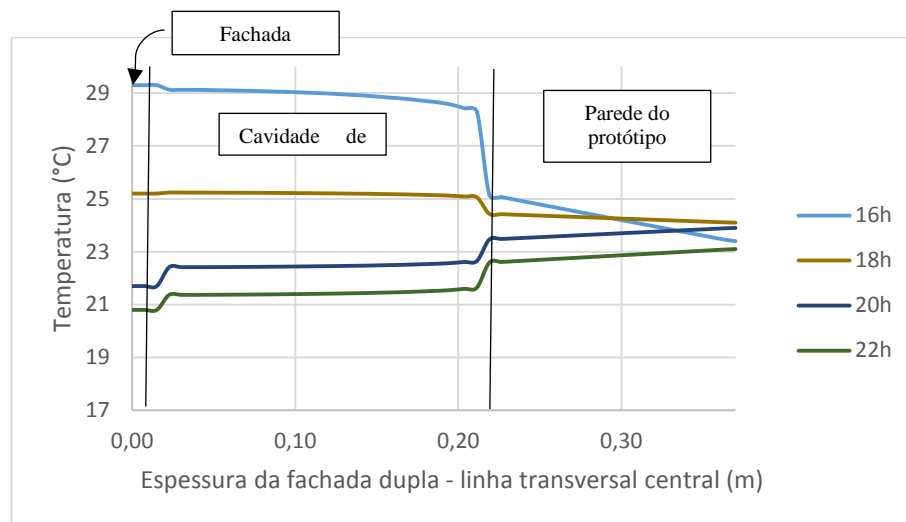


(a)

Figura 4.13 – Variação da temperatura ao longo da linha central transversal de uma fachada dupla (cavidade em 20 cm)



(b)



(c)

Figura 4.13 – Variação da temperatura ao longo da linha central transversal de uma fachada dupla (cavidade em 20 cm)

A partir dos dados apresentados na Figura 4.13 percebe-se o fenômeno da condução tanto na fachada quanto na parede do protótipo e a convecção na cavidade ar.

É possível observar também na Figura 4.13 que nas regiões de contato sólido-fluido há uma mudança brusca de temperatura na maioria dos casos. Isto se dá devido à camada limite térmica que ocorre junto às paredes de modo que as partículas de fluido que entram em contato com estas paredes alcançam o equilíbrio térmico.

Ressalta-se que esta configuração de fachada dupla apresenta uma cavidade em 20 cm, espessura a qual apresenta menor média de velocidade entre as demais configurações e cujo

valor é 0,15 m/s, portanto por meio dos dados apresentados na Figura 4.12 e na Figura 4.13 que a remoção de calor no interior da cavidade não é tão efetiva.

Destaca-se que para o horário de 16h os resultados apresentam os valores mais altos de temperatura, onde a temperatura da face interna da fachada está em torno de 29,3 °C e o valor da temperatura ambiente é 23,7 °C. Para maior detalhamento da troca de calor às 16h o resultado é reapresentado na Figura 4.14 porém em uma escala local, ou seja, tomando o valor mínimo e o valor máximo de temperatura para o momento.

É possível notar que o ar na cavidade chega a ter praticamente a mesma temperatura da fachada. Isto significa que a fachada está recebendo radiação solar direta, e ao aquecer transfere o calor para cavidade e para a parede do protótipo. Demonstra-se que a velocidade do vento é baixa e não contribui com o aumento da circulação do ar e promoção do arrefecimento na cavidade.

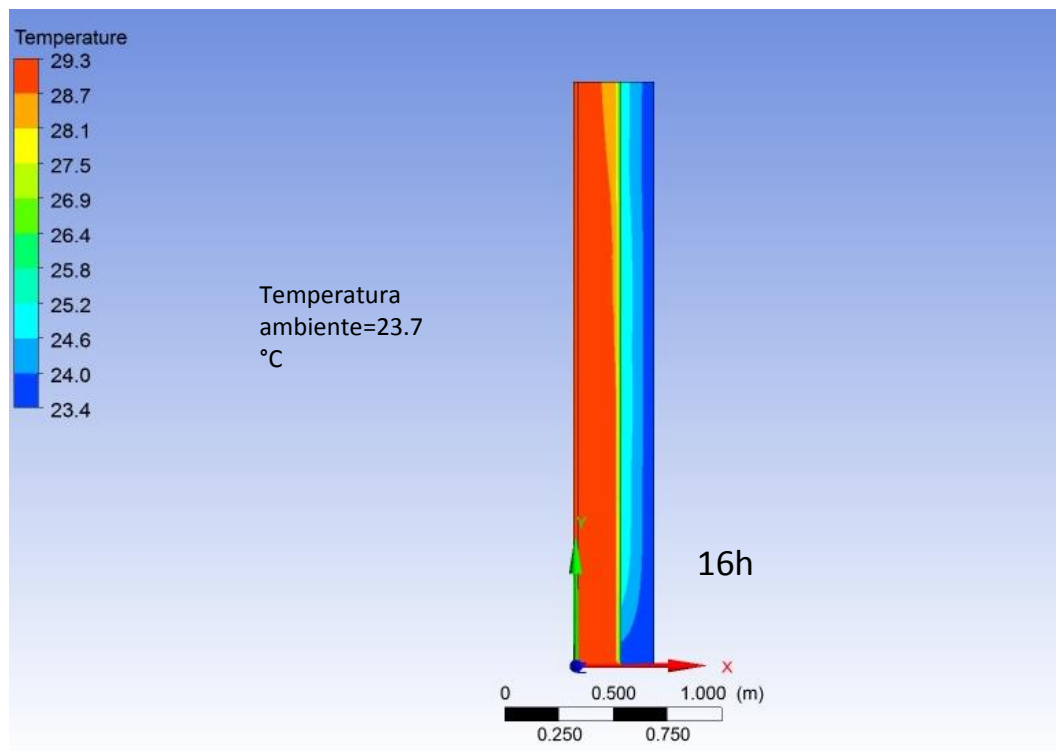


Figura 4.14 – Variação da temperatura às 16 h (cavidade em 20 cm)

Percebe-se que o horário de 16h é um momento crítico e então é feita uma análise do fluxo de ar na cavidade da fachada dupla para este horário. Para tanto, na Figura 4.15 apresentam-se os vetores de velocidade característicos do escoamento.

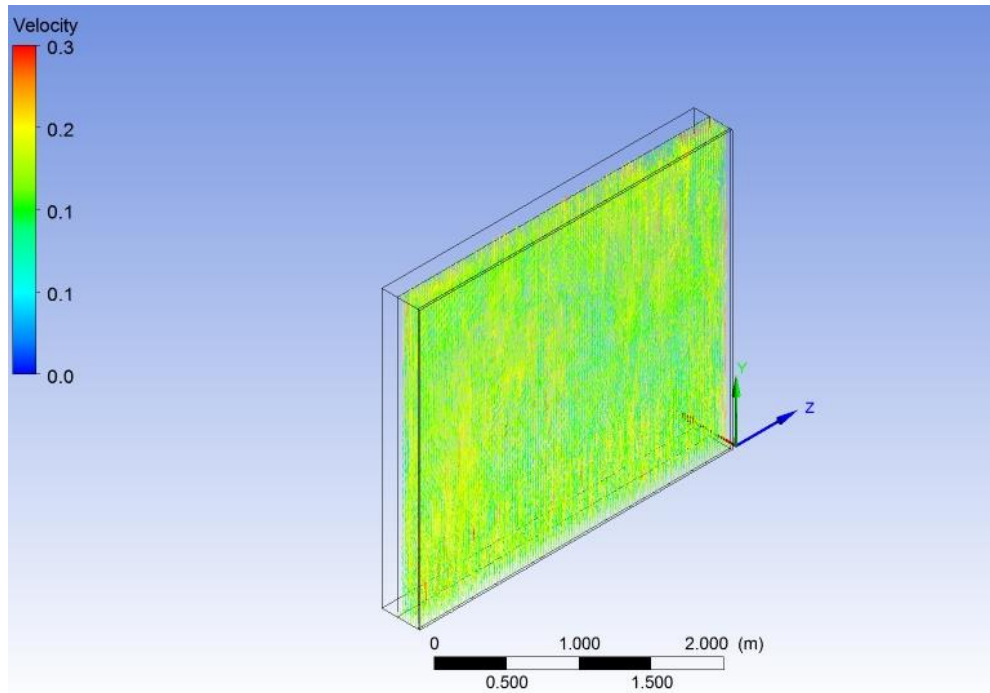


Figura 4.15 – Vetores de velocidade do escoamento de ar (cavidade em 20 cm)

A velocidade do escoamento tanto na entrada (abertura inferior da cavidade) quanto na saída (abertura superior) da cavidade da fachada dupla são obtidas a partir das linhas posicionadas na direção tangencial (eixo z) e os resultados são apresentados na Figura 4.16.

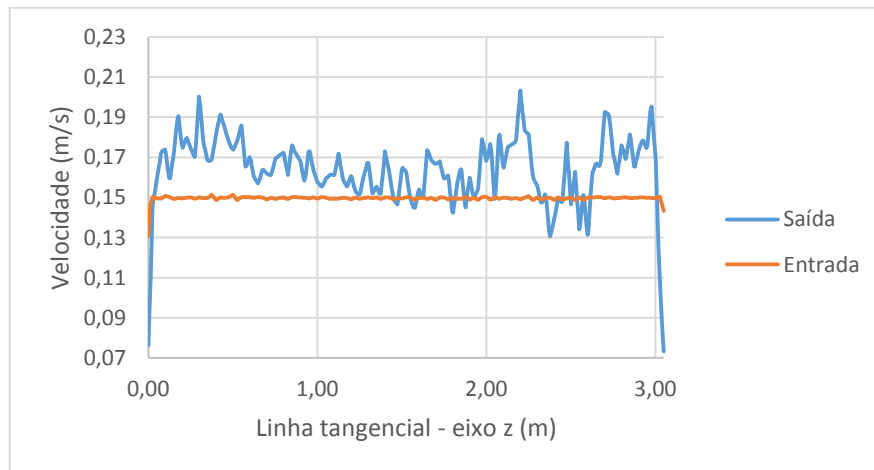


Figura 4.16 – Variação da velocidade do vento na entrada e na saída da cavidade (20 cm)

Percebe-se por meio dos dados apresentados na Figura 4.16 que a média da velocidade na saída é maior do que na entrada, apresentando valores máximos entre 0,19 e 0,21 m/s e valores mínimos entre 0,13 e 0,15 m/s. Destaca-se que os valores obtidos experimentalmente para uma velocidade média pontual na saída foram maiores (0,29 m/s), o que pode ser

justificado pelo fato de que a configuração em 20 cm sofre mais influência da movimentação do ar externo devido a sua maior espessura e o sensor do anemômetro de fio quente ser muito sensível. É possível perceber também a condição de não escorregamento nas extremidades (velocidade nula) onde há o contato do fluido com a parte sólida (no caso o fechamento lateral).

Na Figura 4.17 detalha-se a variação da velocidade ao longo do plano longitudinal da fachada dupla onde é possível perceber a condição de não escorregamento junto às faces da fachada e da parede do protótipo.

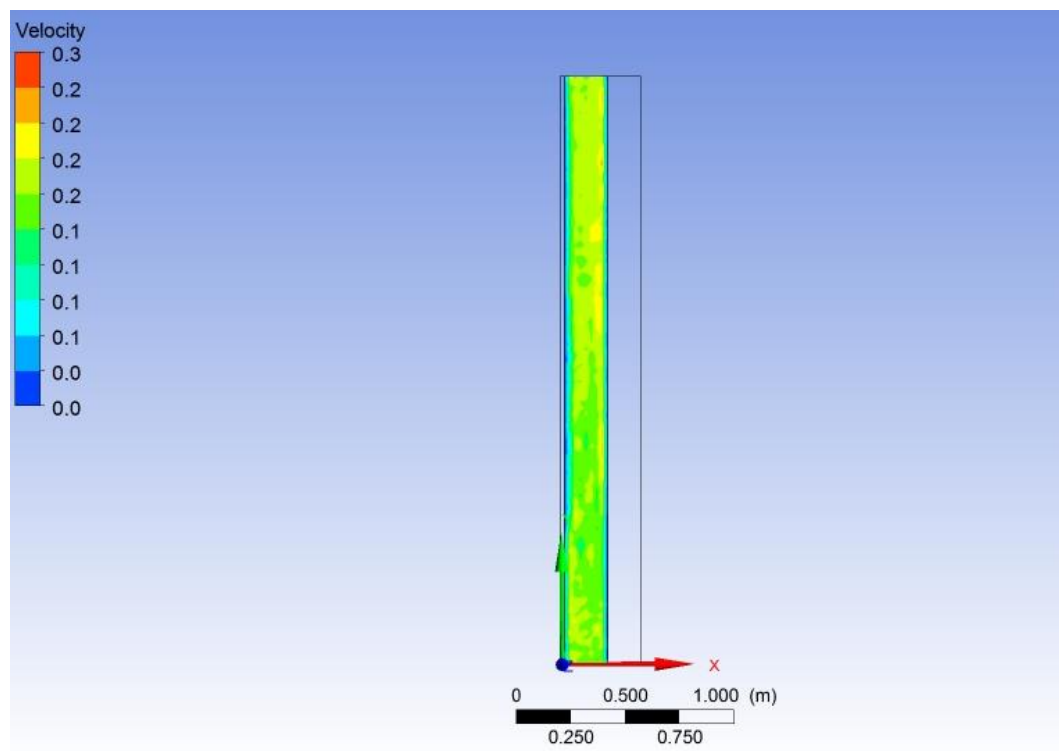


Figura 4.17 – Variação da velocidade no plano longitudinal (20 cm)

O perfil de velocidade na linha central transversal correspondente ao escoamento é apresentado na Figura 4.18. Percebe-se novamente a condição de não escorregamento junto às faces da fachada e da parede do protótipo além de uma maior velocidade no centro, caracterizando um perfil de escoamento típico.

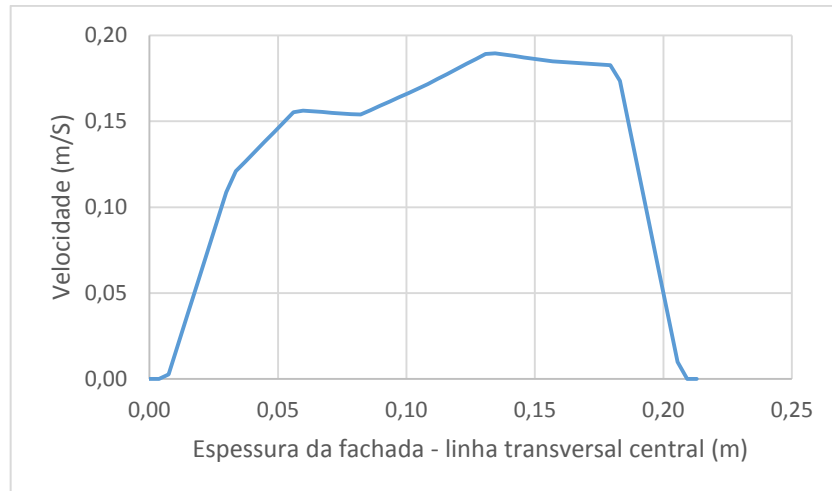


Figura 4.18 – Perfil de velocidade ao longo da linha transversal central (20 cm)

Faz-se necessário a obtenção dos vetores da velocidade tangencial do vento a fim de observar a movimentação do fluido neste plano. Sendo assim, na Figura 4.19 apresenta-se os vetores de velocidade tangencial em três pontos distintos da cavidade da fachada dupla: imediatamente após a entrada, centro e saída.

Por meio do esquema apresentado na Figura 4.19, percebe-se que para todos os casos a movimentação do ar é circular e que à medida em que se caminha em direção a saída da cavidade esta velocidade aumenta. Tal fato pode ser explicado devido ao fenômeno convecção presente na cavidade de modo que a face interna da fachada apresenta maiores valores de temperatura e a face externa da parede apresenta valores menores, criando então uma corrente de convecção neste plano tangencial.

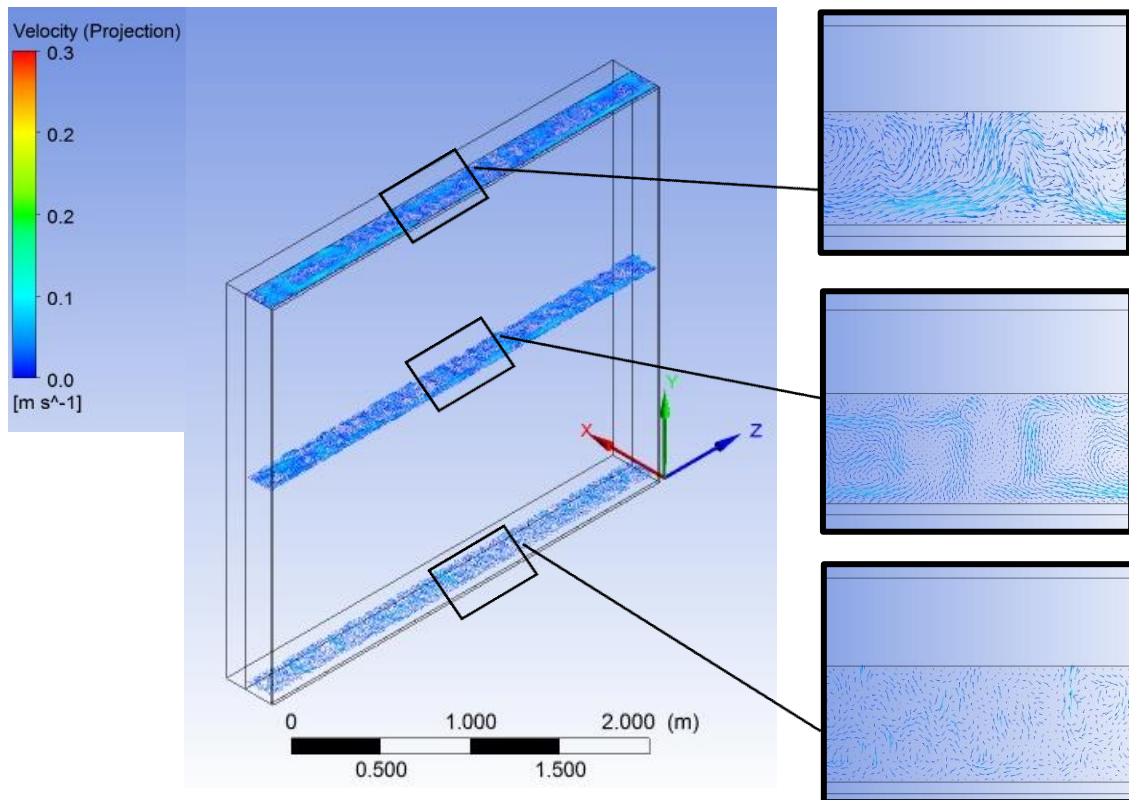


Figura 4.19 – Vetores de velocidade tangencial ao longo do escoamento (20 cm)

4.3.3. Análise numérica para cavidade em 15 cm

Do mesmo modo como realizado para a configuração da cavidade em 20 cm, os resultados da variação temporal da transferência de calor da cavidade em 15 cm ao longo da espessura da fachada dupla são apresentados na Figura 4.20.

A escala foi mantida fixa para o período de um dia baseada nas temperaturas mínimas e máximas considerando todas as faces. A temperatura do ambiente externo também é inserida para cada horário determinado. Deste modo, é possível observar uma evolução da transferência de calor ao longo do dia tomando intervalos de duas em duas horas.

De acordo com a sequência apresentada na Figura 4.20, percebe-se o início do aquecimento da fachada às 8h, atingindo o valor máximo de temperatura às 14h. Com o fim do período solar (após 18h), a temperatura da fachada começa a cair, porém mais rapidamente do que a temperatura da face interna do protótipo.

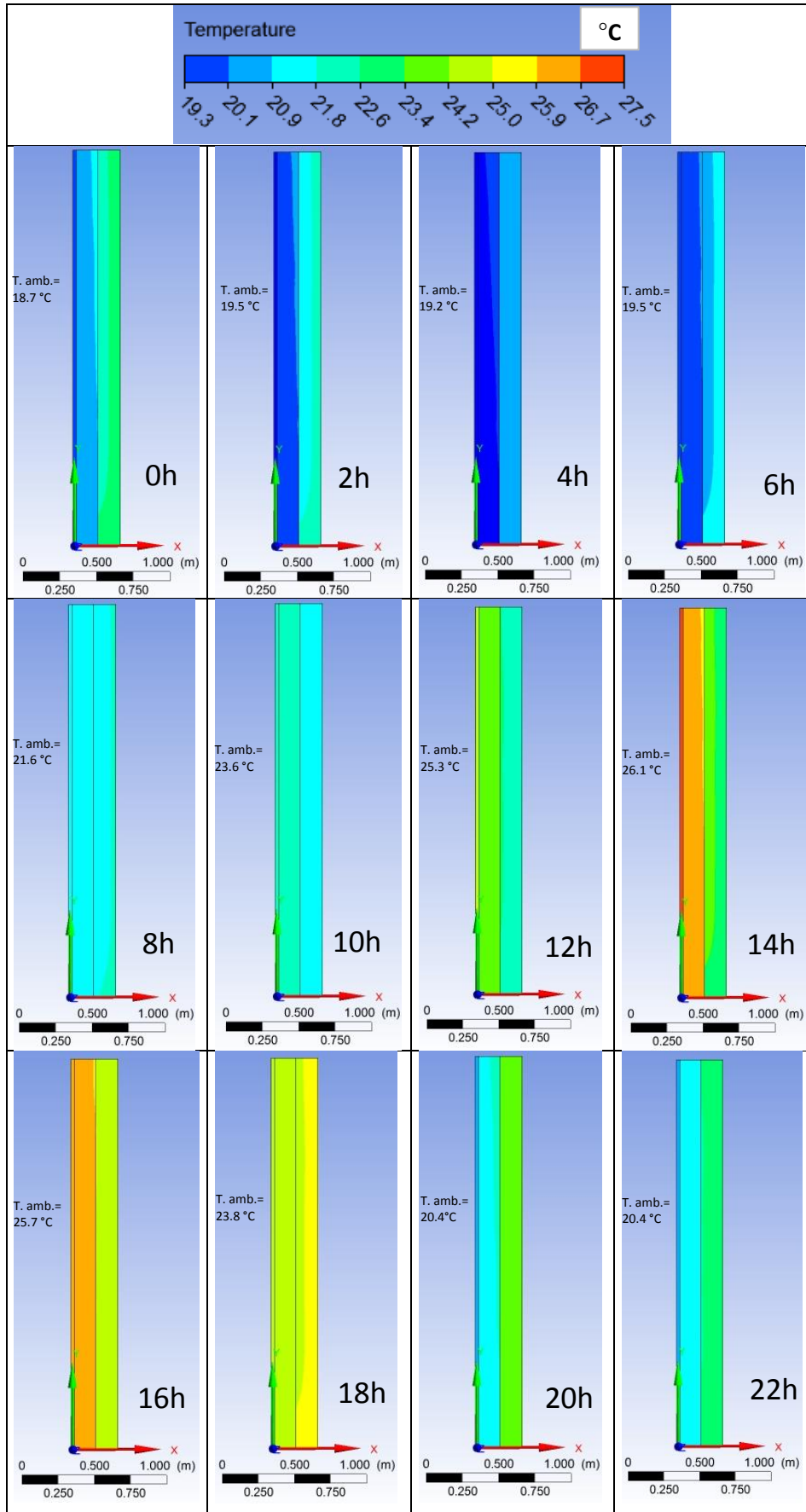
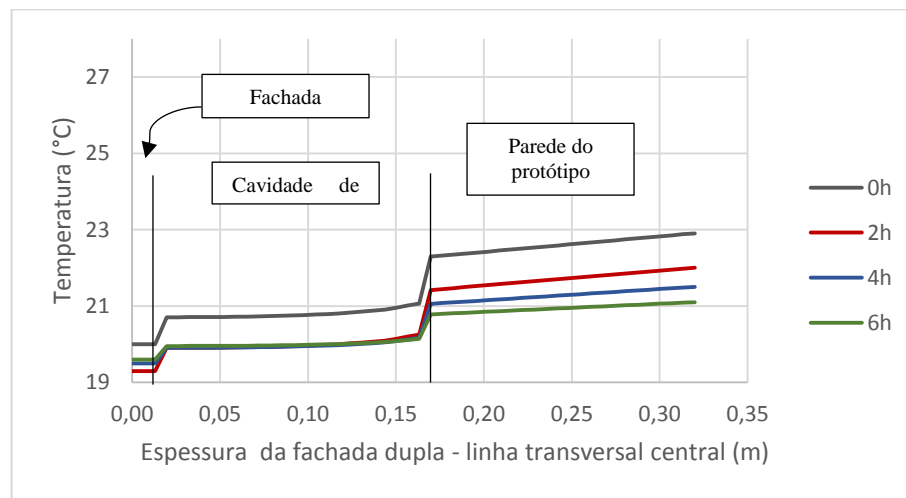


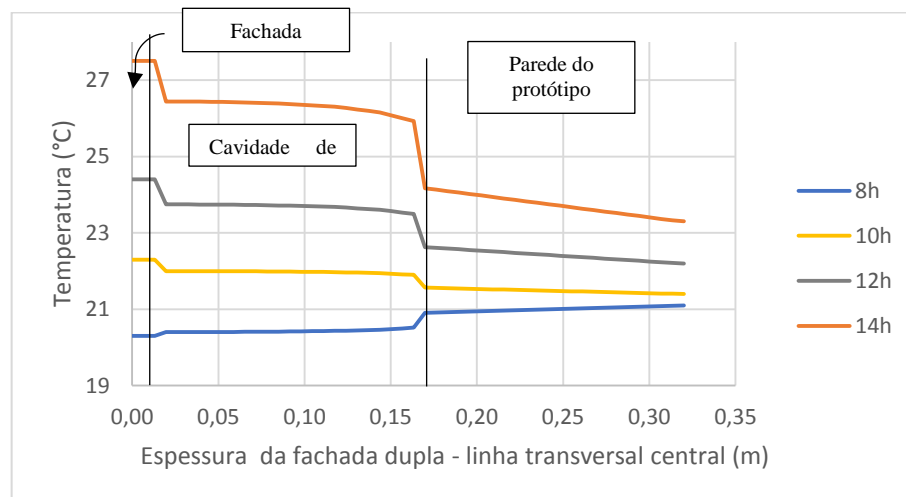
Figura 4.20 - Variação temporal da temperatura para uma fachada dupla (cavidade em 15 cm)

O perfil de temperatura para o horário de 14h apresentado na Figura 4.20 mostra que a temperatura da fachada é mais alta do que a temperatura do ar no interior da cavidade o que demonstra que há uma remoção de calor mais efetiva no interior da cavidade. Ressalta-se que no caso da fachada dupla com configuração da cavidade em 15 cm, a velocidade de entrada do vento é maior do que em 20 cm, passando de 0,15 m/s para 0,20 m/s.

Os gráficos apresentados na Figura 4.21 demonstram a evolução da temperatura ao longo da espessura da parede dupla para a linha transversal central na fachada dupla.



(a)



(b)

Figura 4.21 - Variação da temperatura ao longo da linha central transversal de uma fachada dupla (cavidade em 15 cm)

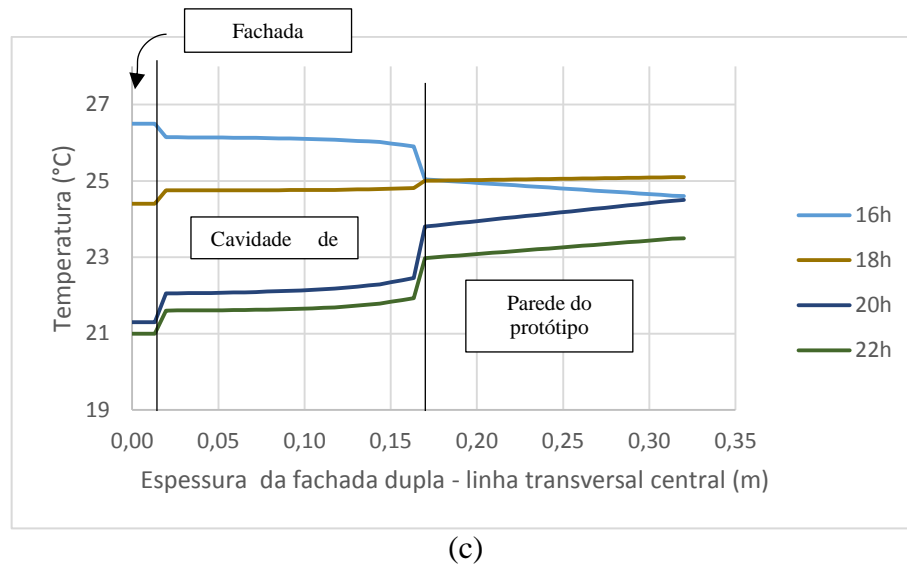


Figura 4.21 - Variação da temperatura ao longo da linha central transversal de uma fachada dupla (cavidade em 15 cm)

Destaca-se que para o horário de 14h os resultados apresentam os valores mais altos de temperatura ao longo do dia, onde a temperatura da face interna da fachada está em torno de 27,5 °C. Para maior detalhamento da troca de calor às 14h o resultado é reapresentado na Figura 4.22 porém em uma escala local, ou seja, tomando o valor mínimo e o valor máximo de temperatura para o momento.

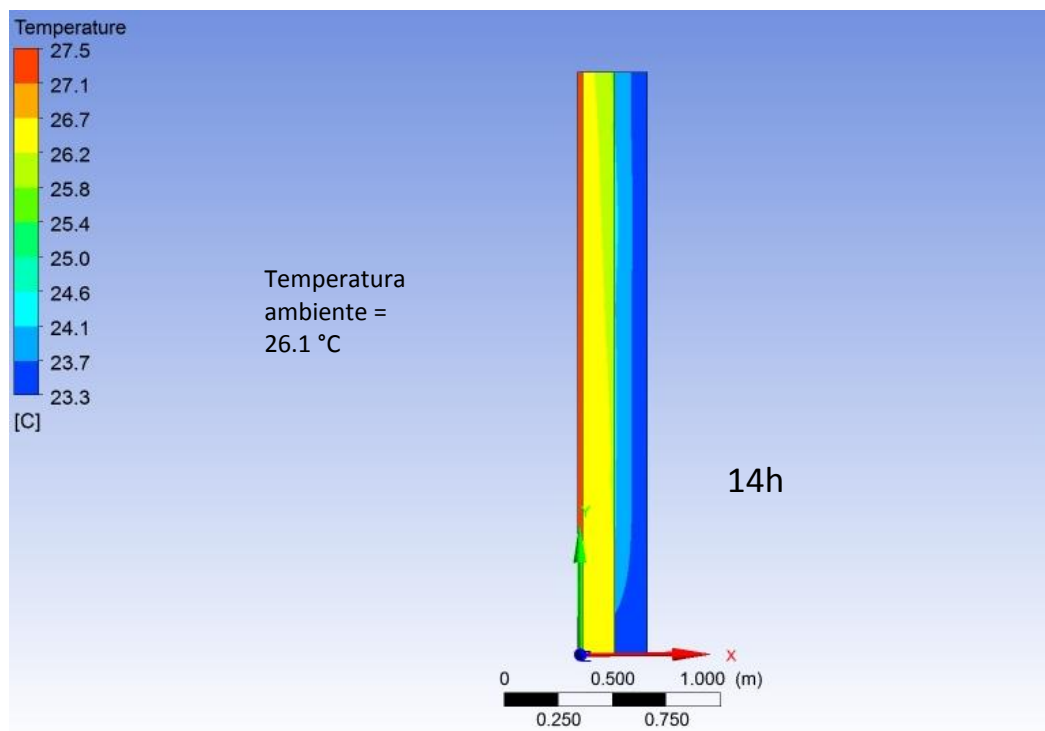


Figura 4.22 - Variação da temperatura às 14h (cavidade em 15 cm)

Percebe-se por meio do perfil de temperatura apresentado na Figura 4.22 que a temperatura da fachada externa atinge um valor máximo de 27,5 °C, porém o ar no interior da cavidade tem uma temperatura mais baixa (em torno de 26,2 °C) o que para este caso demonstra uma relação do aumento da velocidade do vento na entrada com a diminuição da temperatura na fachada dupla.

A fim de observar a evolução da troca de calor, o resultado às 16h é rerepresentado na Figura 4.23 em uma escala local, onde é possível perceber uma diminuição da temperatura externa e uma conservação da temperatura do ar na cavidade, de modo que às 14h sua temperatura é em torno de 26,2 °C e às 16h varia aproximadamente entre 26,1 °C a 26,3 °C. Tal fato pode ser explicado pela maior velocidade do vento na entrada da cavidade (0,20 m/s) o que promove uma maior circulação de ar na fachada dupla em comparação com a configuração de cavidade em 20 cm, mantendo a temperatura do ar na cavidade mais próxima da temperatura do ambiente externo e removendo calor da face interna da fachada dupla.

Percebe-se também que as faces externa e interna da parede do protótipo apresentam valores de temperaturas mais altos às 16h que pode ser justificada pelo atraso térmico.

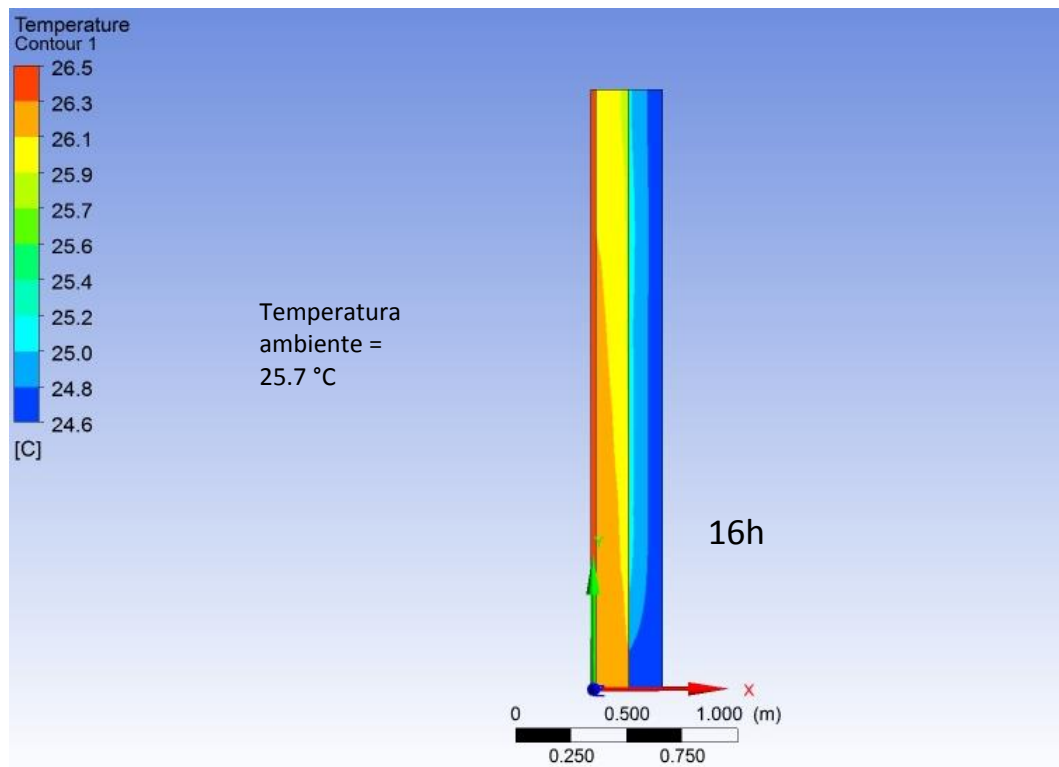


Figura 4.23 - Variação da temperatura às 16h (cavidade em 15 cm)

Seleciona-se, portanto, os resultados para o horário de 14h para análise do fluxo de ar por apresentarem maiores valores para a temperatura externa. Os vetores de velocidade são visualizados na Figura 4.24.

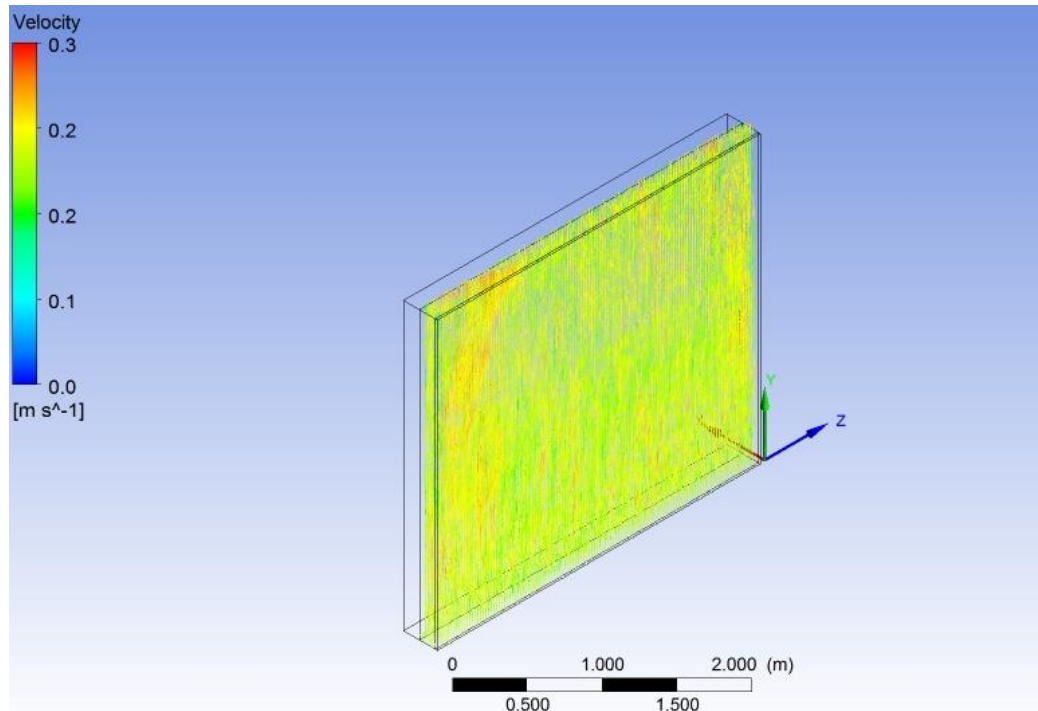


Figura 4.24 - Vetores de velocidade do escoamento de ar (cavidade em 15 cm)

A velocidade do escoamento tanto na entrada (abertura inferior da cavidade) quanto na saída (abertura superior) da cavidade da fachada dupla são obtidas a partir das linhas posicionadas na direção tangencial (eixo z) e os resultados são apresentados na Figura 4.25.

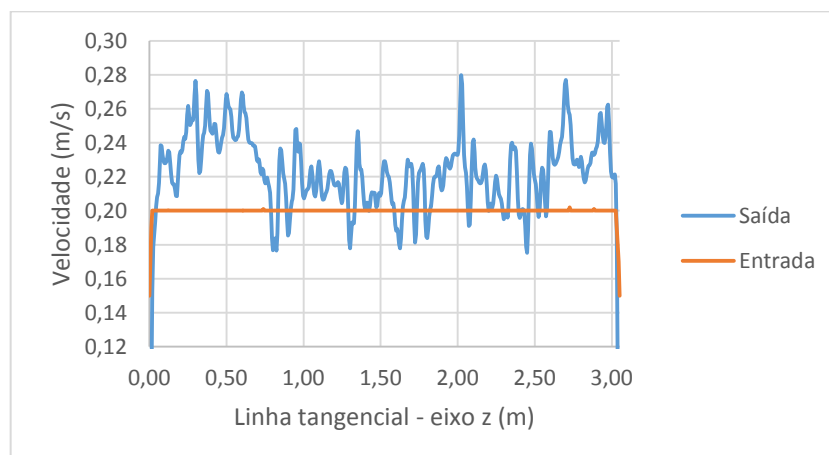


Figura 4.25 - Variação da velocidade do vento na entrada e na saída da cavidade (15 cm)

Percebe-se por meio dos dados apresentados na Figura 4.25 que a média da velocidade na saída é maior do que na entrada, apresentando valores máximos entre 0,26 e 0,28 m/s e valores mínimos entre 0,16 e 0,18 m/s. Nota-se que as velocidades máximas na saída foram compatíveis com o obtido experimentalmente (0,29 m/s) e há uma grande flutuabilidade do ar na saída. É possível notar também a condição de não escorregamento nas extremidades (velocidade nula) onde há o contato do fluido com a parte sólida (no caso o fechamento lateral).

Na Figura 4.26 detalha-se a variação da velocidade do escoamento ao longo do plano longitudinal da fachada dupla onde é possível observar a condição de não escorregamento junto às faces da fachada e da parede do protótipo.

O perfil de velocidade na linha central transversal que corresponde ao escoamento é apresentado na Figura 4.27. Destaca-se novamente a condição de não escorregamento junto às faces da fachada e da parede do protótipo além de uma maior velocidade no centro, caracterizando um perfil de escoamento típico.

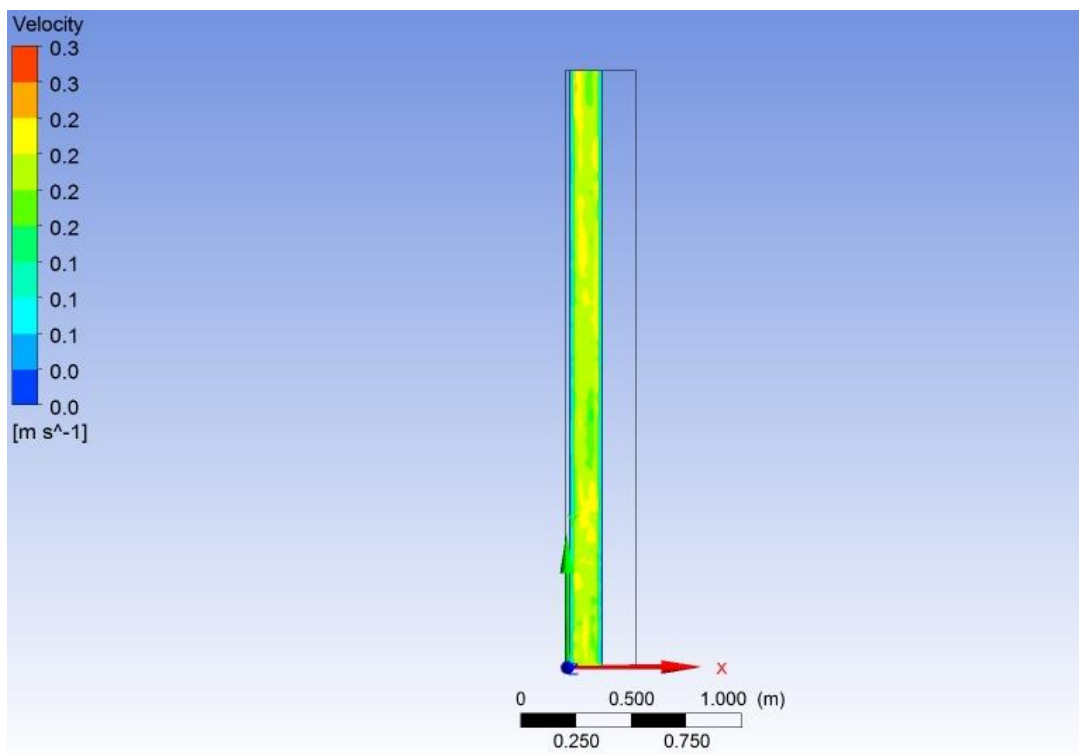


Figura 4.26 - Variação da velocidade no plano longitudinal (15 cm)

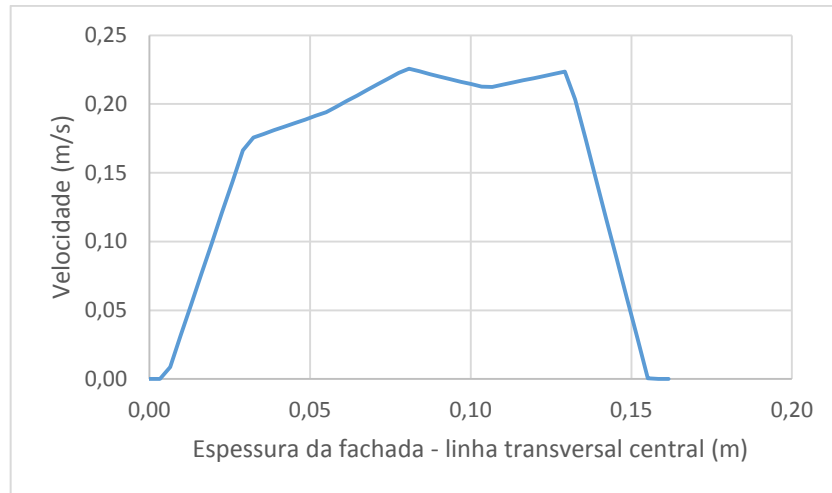


Figura 4.27 - Perfil de velocidade ao longo da linha transversal central (15 cm)

Os vetores da velocidade tangencial do vento também são obtidos para o caso da cavidade em 15 cm. Na Figura 4.28 apresentam-se os vetores de velocidade tangencial em três pontos distintos da cavidade da fachada dupla: imediatamente após a entrada, centro e saída.

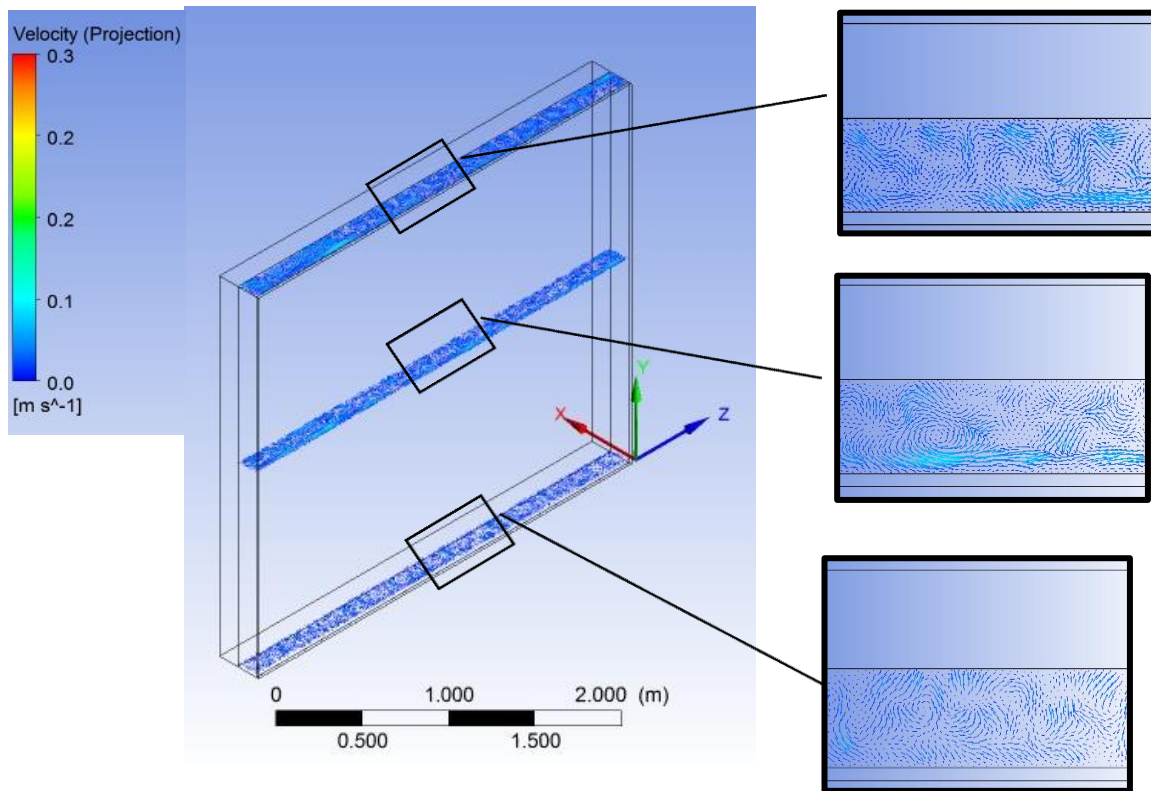


Figura 4.28 - Vetores de velocidade tangencial ao longo do escoamento (15 cm)

Percebe-se por meio das informações contidas na Figura 4.28 (15 cm) e na Figura 4.19 (20 cm) uma similaridade em relação ao escoamento tangencial para os dois casos.

4.3.4. Análise numérica para cavidade em 10 cm

Analogamente ao realizado para a configuração da cavidade em 20 cm e em 15 cm, os resultados da variação temporal da transferência de calor da cavidade em 10 cm ao longo do plano longitudinal central são apresentados na Figura 4.29. A escala foi mantida fixa para o período de um dia baseada nas temperaturas mínimas e máximas considerando todas as faces. A temperatura do ambiente externo também é inserida para cada horário determinado. Deste modo, é possível observar uma evolução da transferência de calor ao longo do dia tomando intervalos de duas em duas horas.

Como ocorre nas outras configurações nota-se na sequência apresentada na Figura 4.29 que o início do aquecimento da fachada ocorre às 8h, e neste caso o valor máximo de temperatura na fachada ocorre às 14h e de forma mais efetiva às 16h. Com o fim do período solar (após 18h), a temperatura da fachada começa a cair, porém mais rapidamente do que a temperatura da face interna do protótipo.

O perfil de temperatura para o horário de 16h apresentado na Figura 4.29 demonstra que a temperatura da fachada é mais alta do que a temperatura do ar no interior da cavidade o que evidencia que há uma remoção de calor mais efetiva no interior da cavidade como na configuração de cavidade em 15 cm porém diferente da configuração de cavidade em 20 cm, onde a temperatura no interior da cavidade era próxima da temperatura da fachada. Destaca-se o fato da configuração da fachada com a cavidade em 10 cm apresentar os maiores valores de velocidade na entrada e então espera-se uma remoção de ar mais efetiva na cavidade.

A evolução da temperatura ao longo da linha transversal central na fachada dupla é apresentada na Figura 4.30.

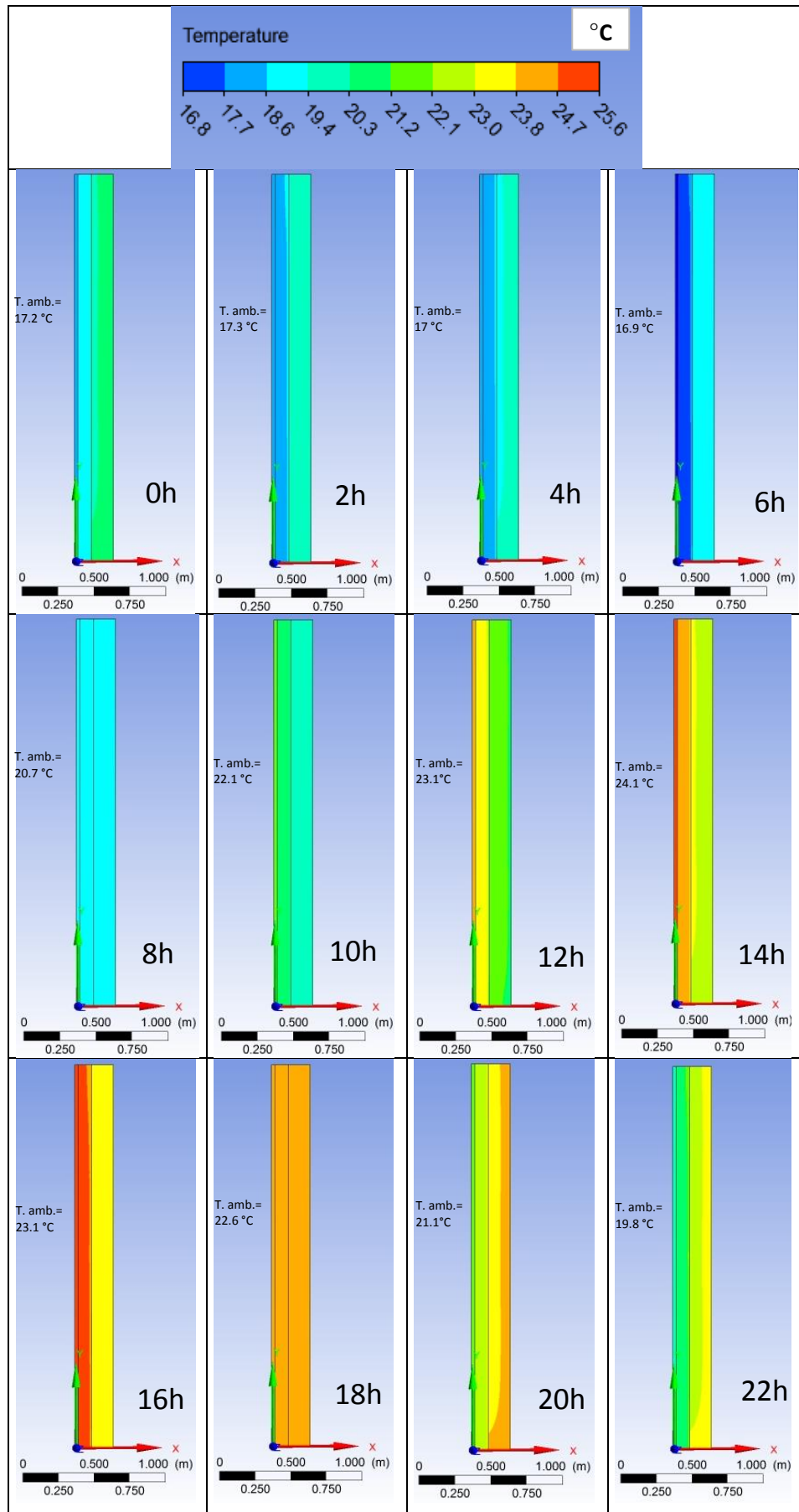
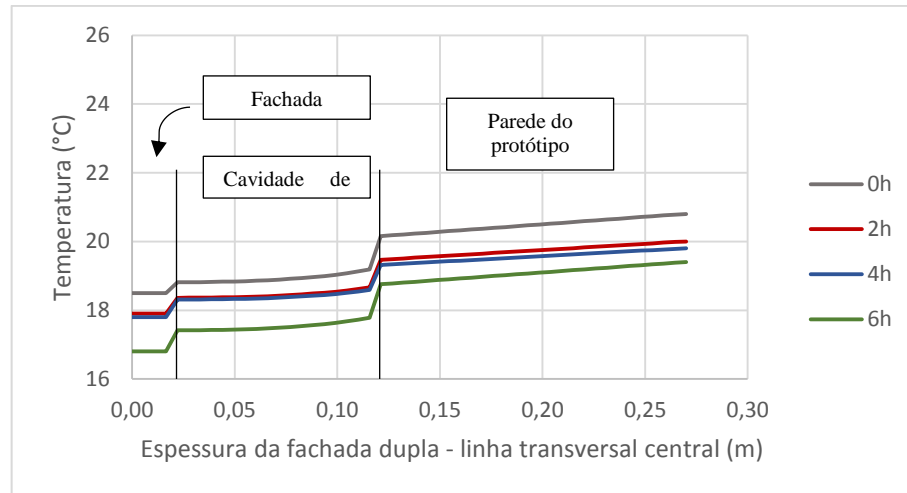
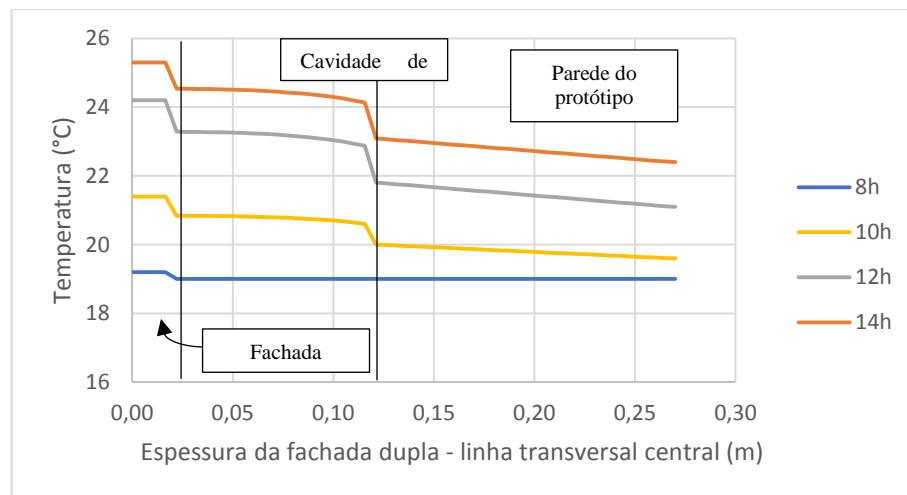


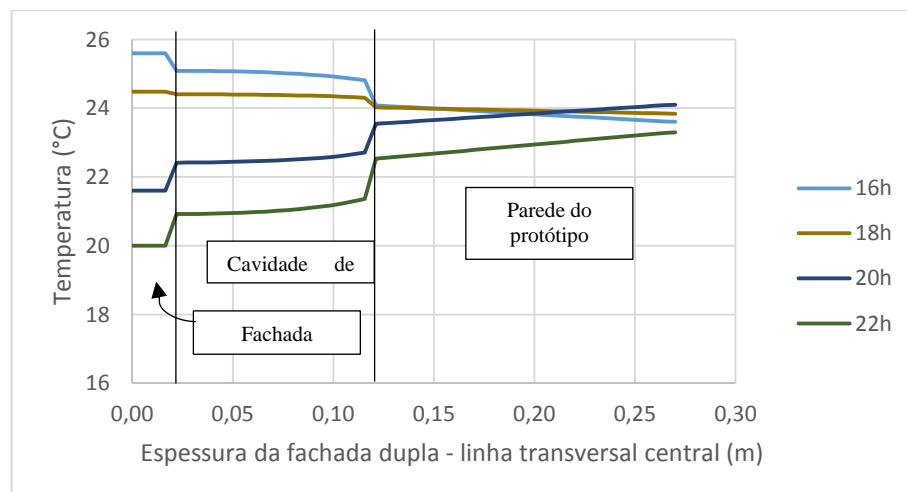
Figura 4.29 - Variação temporal da temperatura para uma fachada dupla (cavidade em 10 cm)



(a)



(b)



(c)

Figura 4.30 - Variação da temperatura ao longo da linha central transversal de uma fachada dupla (cavidade em 10 cm)

Observa-se na Figura 4.30 que a curva para o horário de 16h apresenta uma queda mais suave entre a temperatura da cavidade de ar e a parede do protótipo ao comparado com a espessura em 15 cm (Figura 4.21) e com a espessura de 20 cm (Figura 4.13), esta última apresentando uma queda mais brusca.

De modo análogo às outras configurações de fachada, o esquema apresentado na Figura 4.31 demonstra os resultados detalhados para o horário de 16h em uma escala local, ou seja, tomando o valor mínimo e o valor máximo de temperatura para o momento. Portanto, a velocidade do ar mais alta nesta condição favorece a remoção de calor na cavidade e então nas faces da fachada e na face externa da parede do protótipo dentre as três configurações de espessura.

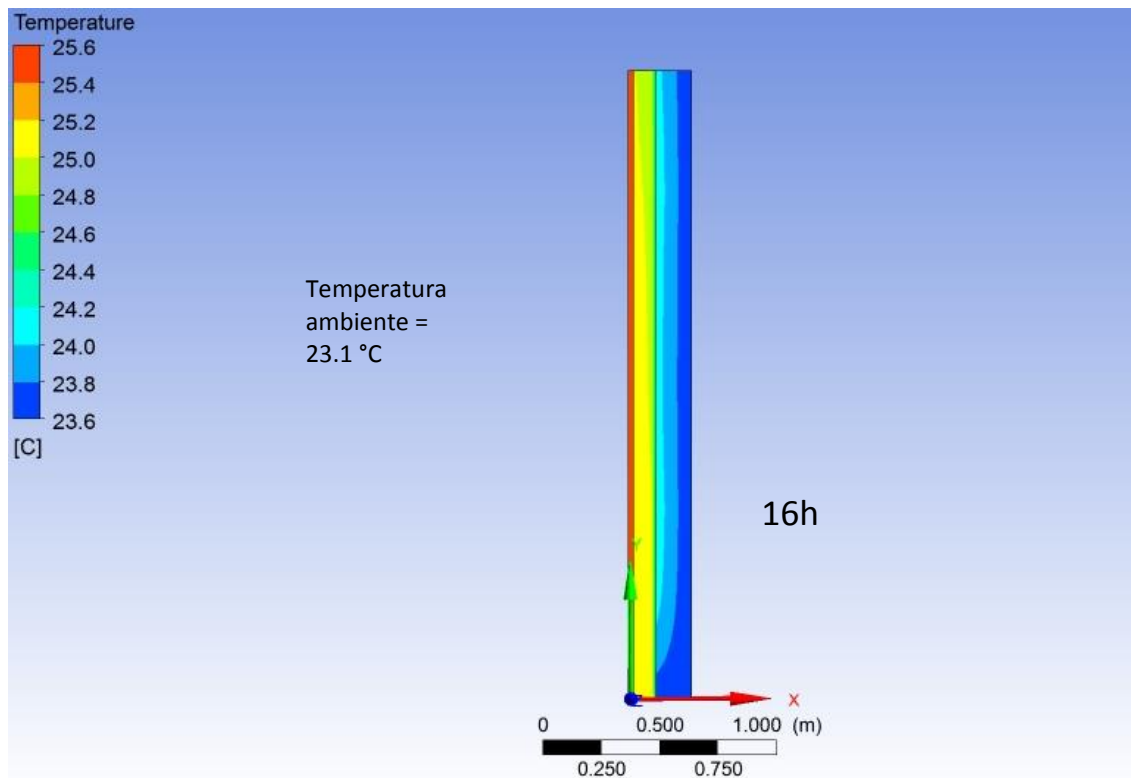


Figura 4.31 - Variação da temperatura às 16h (cavidade em 10 cm)

Para a fachada dupla com cavidade em 10 cm, seleciona-se o horário de 16h para análise do fluxo de ar por apresentar valores de temperatura mais altos nas faces externas. Deste modo, na Figura 4.32 são apresentados os vetores de velocidade do escoamento. Nota-se o maior valor da velocidade entre as três configurações, justificado pelo maior valor de velocidade na entrada da cavidade (0,29 m/s).

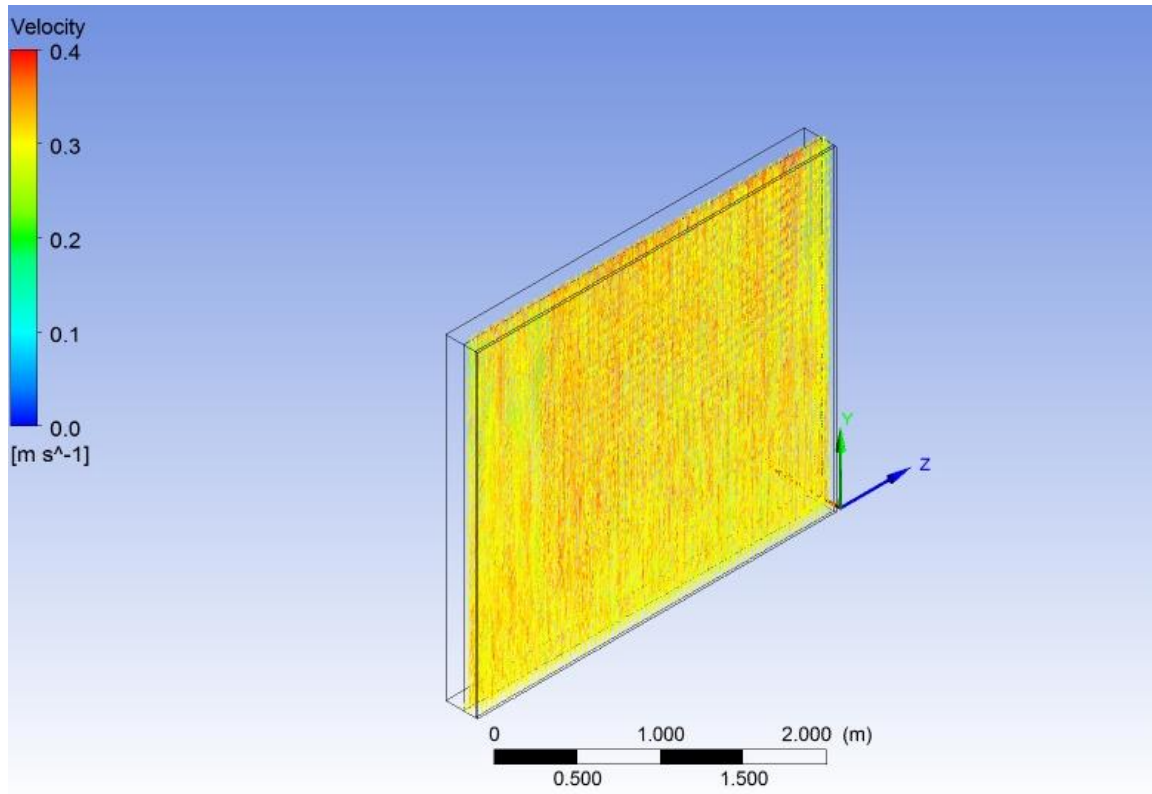


Figura 4.32 - Vetores de velocidade do escoamento de ar (cavidade em 10 cm)

A velocidade do escoamento tanto na entrada (abertura inferior da cavidade) quanto na saída (abertura superior) da cavidade da fachada dupla são obtidas a partir das linhas posicionadas na direção tangencial (eixo z) e os resultados são apresentados na Figura 4.33.

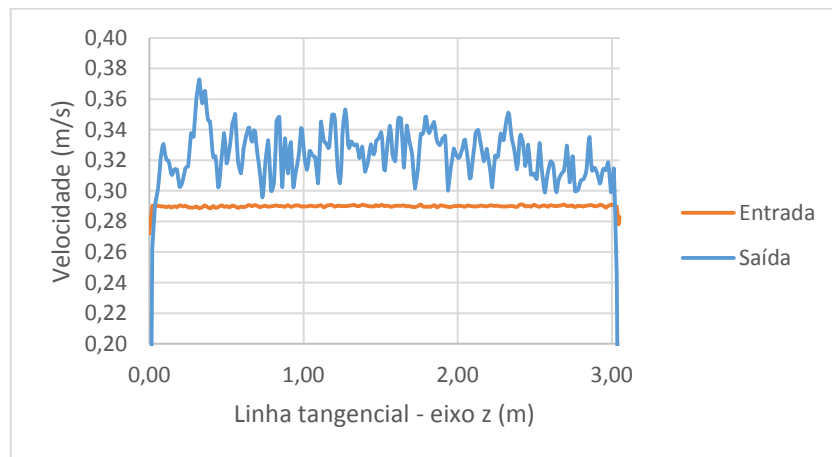


Figura 4.33 - Variação da velocidade do vento na entrada e na saída da cavidade (10 cm)

Os dados apresentados na Figura 4.33 demonstram que a média da velocidade do vento na saída é maior do que na entrada, apresentando valores máximos entre 0,35 e 0,36 m/s e valores mínimos entre 0,29 e 0,30 m/s. Nota-se que os valores máximos de velocidade do

vento obtidos na saída são correspondentes ao valor médio pontual na saída obtido experimentalmente e que há uma alta fluatuabilidade, porém com todos os valores de velocidade acima do valor de velocidade do vento na entrada. É possível perceber também a condição de não escorregamento nas extremidades (velocidade nula) onde há o contato do fluido com a parte sólida (no caso o fechamento lateral).

Na Figura 4.34 detalha-se a variação da velocidade do escoamento, porém neste caso ao longo do plano longitudinal da fachada dupla, onde é possível perceber a condição de não escorregamento junto às faces da fachada e da parede do protótipo e é evidente os maiores valores de velocidade na região central. O perfil de velocidade na linha central transversal correspondente ao escoamento é apresentado na Figura 4.35.

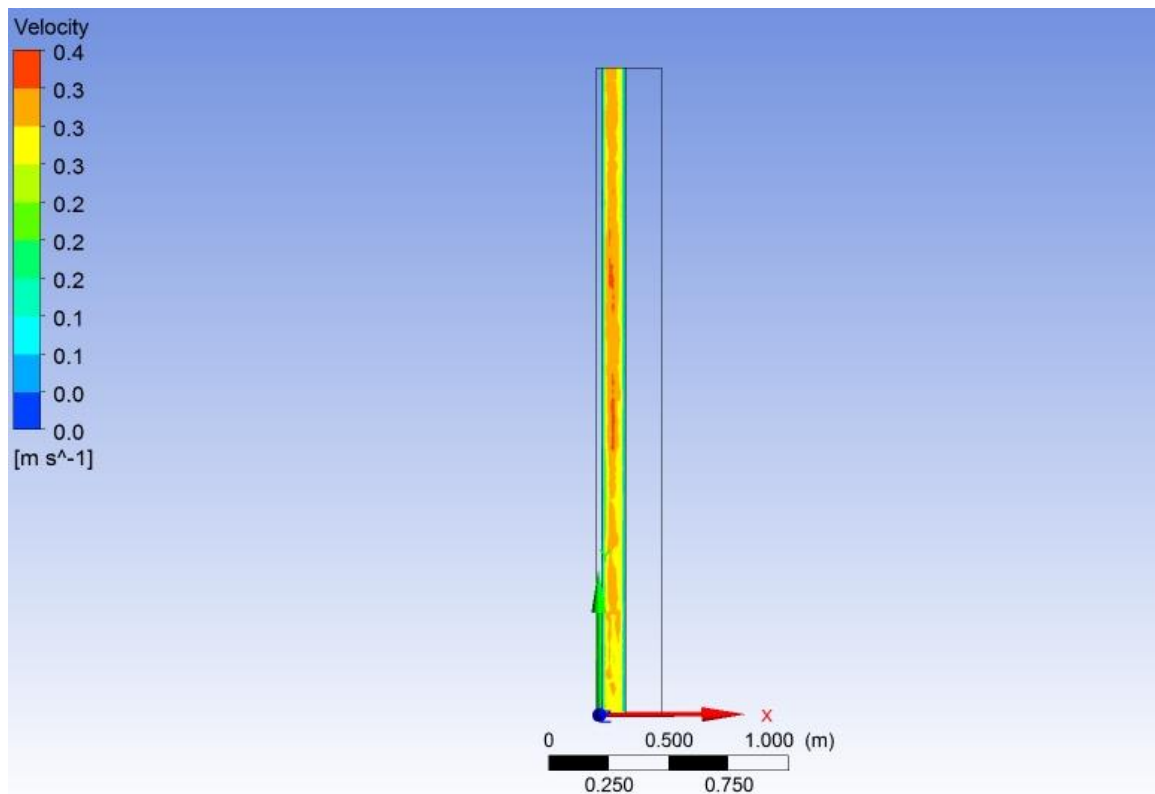


Figura 4.34- Variação da velocidade no plano longitudinal (10 cm)

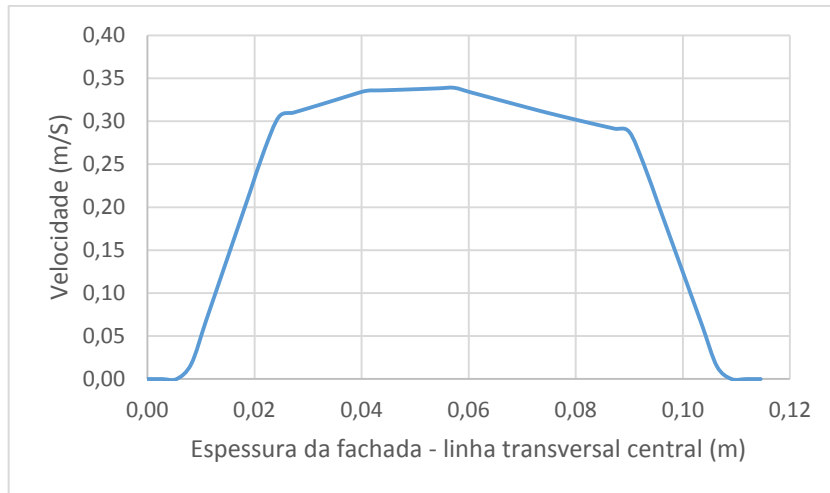


Figura 4.35 - Perfil de velocidade ao longo da linha transversal central (10cm)

Por fim, os vetores da velocidade tangencial também são obtidos para o caso da cavidade em 10 cm. Na Figura 4.36 apresentam-se os vetores de velocidade tangencial em três pontos distintos da cavidade da fachada dupla: imediatamente após a entrada, centro e saída.

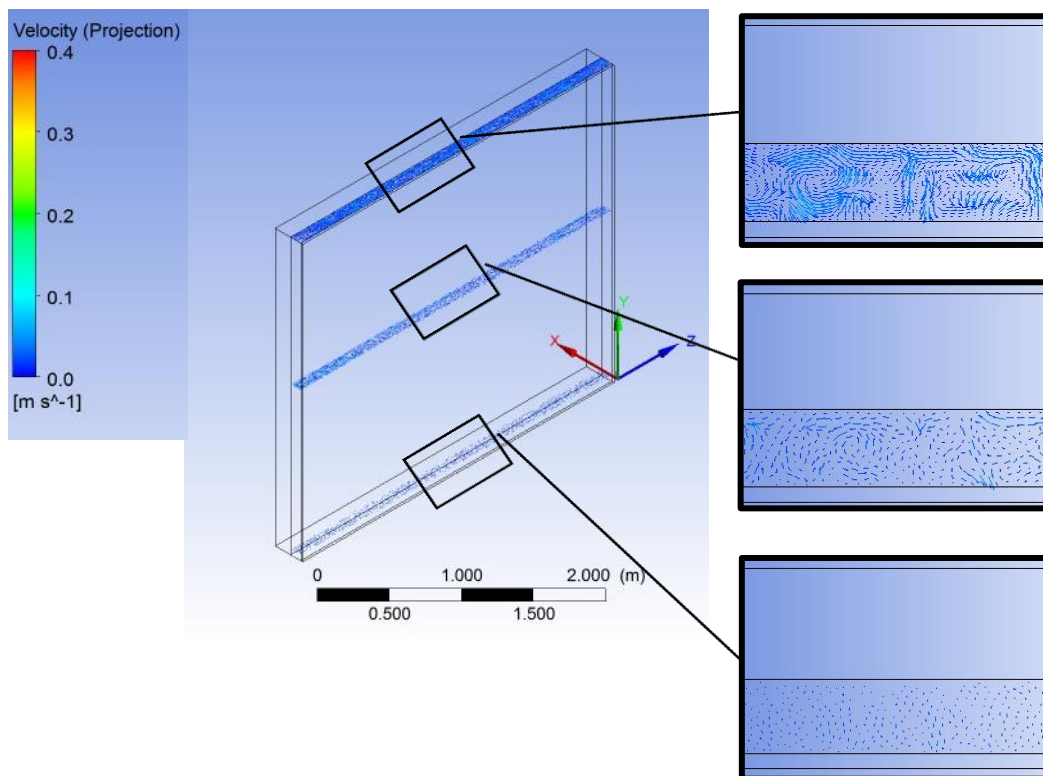


Figura 4.36 - Vetores de velocidade tangencial ao longo do escoamento (10 cm)

As informações contidas na Figura 4.36 mostram que a velocidade tangencial é menor para a fachada dupla com a cavidade em 10 cm ainda que o movimento permaneça circular. Tal fato pode ser justificado pela maior velocidade do vento na entrada, ou seja, devido a menor espessura da parede, a componente normal da velocidade do vento é elevada, reduzindo o valor da componente tangencial.

É importante destacar que não foi possível a realização de medições para todas as configurações de cavidade de forma simultânea pelo fato de haver apenas uma célula protótipo. Assim, não é possível uma comparação para uma mesma condição climática. No entanto, por meio dos resultados mostrados nota-se que há uma relação entre a espessura da cavidade e a variação de temperatura nas faces das paredes, de modo que para este caso, a menor espessura de cavidade apresenta maior velocidade do vento o que favorece a remoção de calor na fachada dupla.

5. CONCLUSÕES

A partir dos resultados apresentados é possível afirmar que a instalação de uma fachada externa, configurando uma parede dupla, é eficaz no que diz respeito à melhoria no conforto térmico de uma edificação uma vez que este dispositivo inibe a radiação solar direta na face externa da parede e ainda cria uma camada de ar circulante na cavidade formada. Tais fatores contribuem com a redução de temperatura no interior da construção podendo ser aplicado em localidades de clima quente.

Em relação ao desempenho térmico, pôde-se concluir que para este experimento a cavidade com espessura de 20 cm propicia uma maior diferença de temperatura entre as faces da fachada e da parede porém tal diferença não implica em uma maior redução de temperatura quando comparado com as outras configurações. Já para a fachada em 10 cm ocorre a maior redução da temperatura na cavidade, o que contribui para a redução da temperatura na face interna da parede do protótipo e para o conforto térmico dos ocupantes. Tal fato pode ser justificado devido a maior velocidade de entrada do vento, permitindo maior renovação do ar na cavidade.

A partir dos resultados dos números de Grashof e Reynolds percebe-se a ocorrência da convecção combinada, de modo que há uma tendência à convecção natural com o aumento da espessura da cavidade e uma tendência à convecção forçada com a diminuição da espessura da cavidade.

Os resultados numéricos confirmam que a espessura da cavidade exerce papel importante no projeto de uma fachada dupla e no seu desempenho, e concordam com os resultados experimentais, sendo a espessura da cavidade em 10 cm mais eficiente. No entanto deve-se estar atento ao fato de que uma espessura de cavidade ótima é dependente de fatores como as condições climáticas locais além das características da fachada dupla, como material, tamanho e distância da parede.

Conclui-se que as fachadas duplas podem ser alternativas simples e eficientes em contribuição ao conforto térmico de edificações. Destaca-se o fato do Brasil ser um país de clima predominante quente e esta tecnologia pode ser empregada visando a eficiência energética de ambientes construídos.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se:

- A avaliação de outros materiais para a fachada externa da fachada dupla.
- A medição da radiação solar recebida na fachada dupla por meio de piranômetros.
- A utilização de ventilação mecânica e comparação com a ventilação natural.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANSYS. **ANSYS CFX**. 2016. Disponível em: <<http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-CFX>> . Acesso em: 06 abr. 2016.

ANSYS. **ANSYS CFX – Solver modeling guide**. Canonsburg, 2013. 626p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15520**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005, 92 p

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15575**: Edificações habitacionais – Desempenho. Rio de Janeiro, 2013, 381 p.

BARBOSA, Sabrina; IP, Kenneth. Perspectives of double skin façades for naturally ventilated buildings: A review. In: **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Oxford: Elsevier, 2014. v.40, pp. 1019 – 1029.

BBRI, 2001, Klimaatgevels, Integrale prestatie-evaluatie van klimaatgevels met bijzondere aandacht voor normalisatieaspecten.- Jaarverslag (em alemão), Limelette: Belgian Building Research Institute apud SAELENS, Dirk. **Energy performance assessment of single storey multiple-skin facades**. 2002. 272p. Tese (Doutorado em Ciências Aplicadas). Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, 2002.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Eficiência Energética – Premissas e Diretrizes Básicas**. Brasília, DF, 2011. 156 p.

CABEZA, L. F; CASTELL, A; MEDRANO, M; MARTORELL, I; PÉREZ, G; FERNÁNDEZ I. Experimental study on the performance of insulation materials in Mediterranean construction. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2010. v.42, pp.630 – 636.

CHEN, CHING-JEN; JAW, SHENQ-YUH. **Fundamentals of turbulence modeling**. Taylor&Francis : New York, 1998.

COMMERZNBANK, 2016. Disponível em <https://www.commerzbank.de/en/hauptnavigation/presse/mediathek/bilddaten/buildings/buildings_1.html>. Acesso em 31 ago. 2016.

de RUITER, P; 1998, Moderne Klimaatgevel. - “The chameleon skin” (em Alemão), Proceedings of Facade en Klimaat, Delft, pp. 6.1-6.12 apud SAELENS, Dirk. **Energy performance assessment of single storey multiple-skin facades**. 2002. 272p. Tese (Doutorado em Ciências Aplicadas). Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, 2002

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

FAIST, A.P. (ed.), 1998, La façade double peau. Mesures in-situ et en laboratoires (em Francês), Lausanne: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Institut de Technique du Batiment apud SAELENS, Dirk. **Energy performance assessment of single storey multiple-skin facades**. 2002. 272p. Tese (Doutorado em Ciências Aplicadas). Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, 2002.

FALLAHI, Ali; HAGHIGHAT, Fariborz; ELSADI, Hafsa. Energy performance assessment of double-skin façade with thermal mass. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2010. v.82, pp. 1499 – 1509.

FORTUNA, Armando de Oliveira. **Técnicas computacionais para Dinâmica dos Fluidos – Conceitos básicos e aplicações**. Edusp: São Paulo, Brasil, 2000.

GABBI, Renan. **Modelagem matemática do escoamento turbulento em canal axissimétrico com “Bluff-Body”**. 2013. 92p. Dissertação (Mestrado em modelagem matemática). Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, RS, 2013.

GRACIA, Álvaro de; CASTELL, Albert; NAVARRO, Lidia; ORÓ, Eduard; CABEZA, Luisa F. Numerical modelling of ventilated facades: A review. In: **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Oxford: Elsevier, 2013. v.22, pp.539 – 54.

GUILLÉN, Ignacio; GÓMEZ-LOZANO, Vicente; FRAN, José María; LÓPEZ-JIMÉNEZ, P. Amparo; Thermal behavior analysis of different multilayer façade: Numerical model versus experimental prototype. In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2014. v.79, pp.184 – 190.

MAPS. 2016. Disponível em: <<https://www.google.com.br/maps/place/Ouro+Preto++MG/@-10.3151711,-46.5687597,4z/data=!4m2!3m1!1s0xa3f85a558935e5:0xd8f8595fc6d76cb0>>. Acesso em: 19 abr. 2016.

HØSEGGEN, R; WACHENFELDT, B.J; HANSSEN, S.O; Building simulation as an assisting tool in decision making Case study: With or without a double-skin façade? In: **Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2008. v.40, pp. 821 – 827.

NICOL, Fergus; HUMPHREYS, Michael; ROAF, Susan. **Adaptive thermal comfort: principles and practice**. London: Routledge; 2012.

MANZ, H; SCHAELEN, A; SIMMLER, H. Airflow patterns and thermal behavior of mechanically ventilated glass double façades. In: **Building and Environment**. Oxford: Elsevier, 2004. v.39, pp.1023 – 1033.

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

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

OFFICIAL JOURNAL OF THE EUROPEAN UNION. Directive 2010/31/eu of the European Parliament and of the Council of 19 may 2010 on the energy performance of buildings (recast). European Union, 2010. L153/13 – 35.

PAPPAS, A; ZHAI, Z. Numerical investigation on thermal performance and correlations of double skin façade with buoyancy-driven airflow. **In: Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2008. v.40, pp.466–75.

PINIWEB. 2017. Disponível em <<http://piniweb.pini.com.br/construcao/mercado-imobiliario/fachadas-do-edificio-cidade-nova-receberam-dupla-pele-de-vidro-87053-1.aspx>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

POIRAZIS, Harris. **Double Skin Façades – A literature review**. Department of Architecture and Built Environment, Lund Institute of Technology, Lund University. Lund 2006.

QUESADA, Guillermo; ROUSSE, Daniel; DUTIL, Yvan; BADACHE, Messaoud; HALLÉ, Stéphane. A comprehensive review of solar facades. Transparent and translucent solar facades. **In: Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Oxford: Elsevier, 2012. v.16, pp. 2643 – 2651.

RADHI, Hassan. Evaluating the potential impact of global warming on the UAE residential buildings – A contribution to reduce the CO₂ emissions. **In: Energy and Buildings**. Oxford: Elsevier, 2009. v.44, pp.2451 – 2462.

SAELENS, Dirk. **Energy performance assessment of single storey multiple-skin facades**. 2002. 272p. Tese (Doutorado em Ciências Aplicadas). Katholieke Universiteit Leuven, Leuven, 2002.

SHAMERI, M. A; ALGHOUL, M. A; SOPIAN, K. S; ZAIN, M. Fauzi M.; ELAYEB Omkalthum. Perspectives of double skin façade systems in buildings and energy saving. **In: Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Oxford: Elsevier, 2011. v.15, pp.1468 – 1475.

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.

APÊNDICE A

Valores das condições de contorno

Espessura da cavidade	Tempo	Temperatura da face interna da fachada	Temperatura da face interna da parede do protótipo	Velocidade do vento na entrada	Temperatura ambiente (externa)
(cm)	(h)	(°C)	(°C)	(m/s)	(°C)
20 cm	00:00	18	19,8	0,15	17,8
	02:00	18,5	19,6	0,15	18
	04:00	18	19,4	0,15	17,8
	06:00	17,7	19,4	0,15	17,9
	08:00	19,1	19,3	0,15	20,3
	10:00	22,6	19,7	0,15	20,7
	12:00	24,4	21	0,15	22,4
	14:00	26,4	22,4	0,15	23,4
	16:00	29,3	23,4	0,15	23,7
	18:00	25,2	24,1	0,15	22,4
	20:00	21,7	23,9	0,15	20,8
	22:00	20,8	23,1	0,15	19,7
15 cm	00:00	20,0	22,9	0,2	18,7
	02:00	19,3	22,0	0,2	19,5
	04:00	19,5	21,5	0,2	19,2
	06:00	19,6	21,1	0,2	19,5
	08:00	20,3	21,1	0,2	21,6
	10:00	22,3	21,4	0,2	23,6
	12:00	24,4	22,2	0,2	25,3
	14:00	27,5	23,3	0,2	26,1
	16:00	26,5	24,6	0,2	25,7
	18:00	24,4	25,2	0,2	23,8
	20:00	21,3	24,5	0,2	20,4
	22:00	21,0	23,5	0,2	20,4
10 cm	00:00	18,5	20,8	0,29	17,2
	02:00	17,9	20,0	0,29	17,3
	04:00	17,8	19,8	0,29	17,0
	06:00	16,8	19,4	0,29	16,9
	08:00	19,2	19,0	0,29	20,7
	10:00	21,4	19,6	0,29	22,1
	12:00	24,2	21,1	0,29	23,1
	14:00	25,3	22,4	0,29	24,1
	16:00	25,6	23,6	0,29	23,1
	18:00	24,5	23,8	0,29	22,6
	20:00	21,6	24,1	0,29	21,1
	22:00	20,0	23,3	0,29	19,8

APÊNDICE B

Cálculo do número de Richardson

Tempo	Temperatura da face interna da fachada	Temperatura da face externa real da parede do protótipo	L	Dh	V	β	ν	Gr	Re	Ri
(h)	(°C)	(°C)	(m)	(m)	(m/s)	(K ⁻¹)	(m ² /s)			
00:00	18	18,6	2,7	2,864	0,15	3,43E-03	1,81E-05	1,21E+09	2,37E+04	2,2
02:00	18,5	18,7	2,7	2,864	0,15	3,43E-03	1,82E-05	4,00E+08	2,36E+04	0,7
04:00	18	18,5	2,7	2,864	0,15	3,43E-03	1,81E-05	1,01E+09	2,37E+04	1,8
06:00	17,7	18,3	2,7	2,864	0,15	3,43E-03	1,81E-05	1,21E+09	2,37E+04	2,2
08:00	19,1	18,8	2,7	2,864	0,15	3,42E-03	1,82E-05	5,99E+08	2,36E+04	1,1
10:00	22,6	20,8	2,7	2,864	0,15	3,39E-03	1,83E-05	3,52E+09	2,35E+04	6,4
12:00	24,4	22,5	2,7	2,864	0,15	3,37E-03	1,84E-05	3,65E+09	2,34E+04	6,7
14:00	26,4	24,2	2,7	2,864	0,15	3,35E-03	1,85E-05	4,16E+09	2,32E+04	7,7
16:00	29,3	26,1	2,7	2,864	0,15	3,32E-03	1,86E-05	5,94E+09	2,31E+04	11,1
18:00	25,2	25,3	2,7	2,864	0,15	3,35E-03	1,85E-05	1,89E+08	2,32E+04	0,4
20:00	21,7	23,1	2,7	2,864	0,15	3,38E-03	1,83E-05	2,73E+09	2,35E+04	5,0
22:00	20,8	21,9	2,7	2,864	0,15	3,40E-03	1,83E-05	2,15E+09	2,35E+04	3,9
00:00	20,0	21,4	2,7	2,864	0,2	3,40E-03	1,83E-05	2,73E+09	3,13E+04	2,8
02:00	19,3	20,5	2,7	2,864	0,2	3,41E-03	1,82E-05	2,41E+09	3,15E+04	2,4
04:00	19,5	20,3	2,7	2,864	0,2	3,41E-03	1,82E-05	1,53E+09	3,15E+04	1,5
06:00	19,6	20,3	2,7	2,864	0,2	3,41E-03	1,82E-05	1,37E+09	3,15E+04	1,4
08:00	20,3	20,5	2,7	2,864	0,2	3,41E-03	1,82E-05	2,78E+08	3,15E+04	0,3
10:00	22,3	21,7	2,7	2,864	0,2	3,39E-03	1,83E-05	1,29E+09	3,13E+04	1,3
12:00	24,4	23,1	2,7	2,864	0,2	3,37E-03	1,84E-05	2,52E+09	3,11E+04	2,6
14:00	27,5	25,4	2,7	2,864	0,2	3,34E-03	1,85E-05	4,01E+09	3,10E+04	4,2
16:00	26,5	25,8	2,7	2,864	0,2	3,34E-03	1,85E-05	1,36E+09	3,10E+04	1,4
18:00	24,4	25,1	2,7	2,864	0,2	3,36E-03	1,85E-05	1,27E+09	3,10E+04	1,3
20:00	21,3	22,8	2,7	2,864	0,2	3,39E-03	1,83E-05	3,01E+09	3,13E+04	3,1
22:00	21,0	22,2	2,7	2,864	0,2	3,39E-03	1,83E-05	2,39E+09	3,13E+04	2,4
00:00	20,8	19,1	2,7	2,864	0,29	3,41E-03	1,82E-05	3,36E+09	4,56E+04	1,6
02:00	20,0	18,8	2,7	2,864	0,29	3,42E-03	1,82E-05	2,41E+09	4,56E+04	1,2
04:00	19,8	18,8	2,7	2,864	0,29	3,42E-03	1,82E-05	2,09E+09	4,56E+04	1,0
06:00	19,4	18,0	2,7	2,864	0,29	3,43E-03	1,82E-05	2,78E+09	4,56E+04	1,3
08:00	19,0	18,8	2,7	2,864	0,29	3,42E-03	1,82E-05	3,99E+08	4,56E+04	0,2
10:00	19,6	20,3	2,7	2,864	0,29	3,41E-03	1,82E-05	1,33E+09	4,56E+04	0,6
12:00	21,1	22,4	2,7	2,864	0,29	3,39E-03	1,83E-05	2,56E+09	4,54E+04	1,2
14:00	22,4	23,8	2,7	2,864	0,29	3,38E-03	1,84E-05	2,68E+09	4,51E+04	1,3
16:00	23,6	24,6	2,7	2,864	0,29	3,36E-03	1,84E-05	2,00E+09	4,51E+04	1,0
18:00	24,2	24,9	2,7	2,864	0,29	3,36E-03	1,85E-05	1,46E+09	4,49E+04	0,7
20:00	24,1	23,1	2,7	2,864	0,29	3,37E-03	1,84E-05	1,79E+09	4,51E+04	0,9
22:00	23,3	21,8	2,7	2,864	0,29	3,38E-03	1,84E-05	2,91E+09	4,51E+04	1,4

Espessura da cavidade:

20cm

15cm

10cm