Corina Faria Bianco

**Parede Trombe: estudo experimental comparativo de desempenho
térmico para aquecimento e arrefecimento na cidade de São Paulo**

São Paulo

2016

Corina Faria Bianco

Parede Trombe: estudo experimental comparativo de desempenho térmico para aquecimento e arrefecimento na cidade de São Paulo

Dissertação apresentada à Faculdade de
Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo Marques Monteiro.

São Paulo
2016

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISAS, DESDE QUE CITADA A FONTE.

E-mail: corinafbianco@gmail.com

EXEMPLAR REVISADO E ALTERADO EM RELAÇÃO À VERSÃO ORIGINAL, SOB RESPONSABILIDADE DO AUTOR E ANUÊNCIA DO ORIENTADOR.

O original se encontra disponível na sede do programa

São Paulo, 1º de julho de 2016.

Bianco, Corina Faria

B578p Parede Trombe: estudo experimental comparativo de desempenho térmico para aquecimento e arrefecimento na cidade de São Paulo /

Corina Faria Bianco. --São Paulo, 2016.

343 p.:il.

Dissertação (Mestrado- Área de Concentração: Tecnologia da Arquitetura)–FAUUSP.

Orientador: Leonardo Marques Monteiro

1.Conforto térmico (Desempenho) 2.Aquecimento 3.Arrefecimento
4.Parede trombe

CDU 697

Folha de Aprovação

Bianco, C.F. **Parede Trombe: estudo experimental comparativo de desempenho térmico para aquecimento e arrefecimento na cidade de São Paulo.** 2016. 343 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2016.

Aprovada em:

Banca examinadora

Prof. Dr. Leonardo Marques Monteiro

Instituição: FAU - USP

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Prof. Dr. Arlindo Tribess

Instituição: EP – USP

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Prof.^a Dra. Joana Carla Soares Gonçalves

Instituição: FAU – USP

Julgamento: _____

Assinatura: _____

Dedicatória

Aos meus filhos, netos e companheiro.

Agradecimentos

Ao meu orientador Prof. Dr. Leonardo Marques Monteiro, pelas orientações e ensinamentos, mas, principalmente pelo entusiasmo, carinho e respeito.

À Profa. Dra. Marcia Alucci, mentora do tema da pesquisa. À Profa. Dra. Anésia Barros Frota, pelo incentivo e credibilidade. Aos professores das disciplinas cursadas, pelas contribuições infinitas. Ao prof. Dr. Reginaldo Ronconi pelo apoio ao desenvolvimento da pesquisa no Anexo. Agradecimentos especiais ao Sr. Romerito e ao Ranieri, suas dedicações e envolvimento foram fundamentais. Aos professores do LABAUT pela contribuição e carinho dispensados.

Aos colegas desta jornada pela companhia e troca de conhecimentos, em especial aos colegas que se tornaram amigos, Silvia Bigoni, Altimar Cypriano, Cristiane Sato, Luiz Felipe Xavier e Leonardo Maia.

Aos meus anjos da guarda: José Luiz Cesso, José Fazzani e Marco Fazzani, sem vocês não teria conseguido.

Aos meus filhos, netos e companheiro pela compreensão, carinho, incentivo e amor. Vocês são minha fonte de energia.

Corina Faria Bianco

Epígrafe

“A Terra tem o suficiente para todas as nossas necessidades, mas somente o necessário”. (Mahatma Gandhi)

Resumo

Bianco, C.F. **Parede Trombe: estudo experimental comparativo de desempenho térmico para aquecimento e arrefecimento na cidade de São Paulo.** 2016. 336 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2016.

O objeto desta pesquisa é o desempenho térmico do sistema passivo parede Trombe para aquecimento e arrefecimento. O objetivo é avaliar o desempenho térmico dessa tecnologia específica, nesse caso, no clima da cidade de São Paulo. Os métodos utilizados foram a execução do projeto com diretrizes originadas da literatura científica, a construção de dois protótipos, o monitoramento térmico desses protótipos, o tratamento dos dados e a análise e interpretação destes. Os resultados mostram o desempenho encontrado para o clima da cidade de São Paulo e apontam para novas possibilidades de pesquisas.

Palavras-chave: Parede Trombe. Desempenho térmico. Aquecimento. Arrefecimento.

Abstract

Bianco, C.F. Trombe wall: a comparative experimental study of thermal performance for heating and cooling in the city of São Paulo. 2016. 336 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo, 2016.

The object of this research is the thermal performance of the Trombe wall passive system for heating and cooling. The objective is the evaluation of the environmental performance of this technology, in this case, in the climate of the city of São Paulo. The methods used were the execution of a project with guidelines originated from scientific literature, the construction of two prototypes and their thermal monitoring, data treatment and their analyses and interpretation. The results show the performance of the system for the climate of the city of São Paulo and point out to new research possibilities.

Keywords: Trombe wall. Thermal performance. Heating. Cooling.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Considerações iniciais	1
1.2 Clima e arquitetura no Brasil	2
1.3 Desempenho térmico em edificações	4
1.4 Objetivos	5
1.5 Estrutura do trabalho	5
2 PAREDE TROMBE	5
2.1 Conceito do funcionamento	6
2.1.1 Processo de funcionamento	9
2.1.2 Componentes da parede Trombe	11
2.1.2.1 Parede de massa	11
2.1.2.2 Vidro	13
2.1.2.3 Caixa de ar	14
2.1.2.4 Ventilação	15
2.2 O estado da arte	16
2.2.1 O estado da arte no mundo	16
2.2.2 O estado da arte no Brasil	41
3 MÉTODOS	44
3.1 Introdução	44
3.2 O projeto	45
3.2.1 Local da implantação	46
3.2.2 Critérios de implantação	48
3.2.3 O Projeto arquitetônico	49
3.2.4 Diretrizes projetuais	55
3.2.5 Considerações sobre o projeto	59

3.3 Execução da obra	61
3.4 Medições	71
3.4.1 Instrumentos e localizações	71
3.4.2 Testes	75
3.4.3 Dados fornecidos pelo IEE	78
3.4.4 Medições com câmera termográfica	80
3.5 Monitoramento e tratamento de dados	82
3.6 Análise e interpretação dos dados	82
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	83
4.1 Introdução	83
4.2 Comportamento térmico das coberturas e da parede Trombe: antes e após o isolamento das coberturas	83
4.3 Resultados e análises	87
4.3.1 Resultados do cenário 1 para aquecimento passivo noturno	87
4.3.1.1 Aberturas superiores e inferiores	87
4.3.1.1.1 Temperatura do ar	87
4.3.1.1.2 Velocidade do ar	88
4.3.1.2 Coberturas	89
4.3.1.2.1 Temperatura superficial interna e externa	89
4.3.1.3 Paredes fachada norte	90
4.3.1.3.1 Temperatura superficial interna e externa	90
4.3.1.4 Vidro	92
4.3.1.4.1 Temperatura superficial interna e externa	92
4.3.1.5 Tripés	92
4.3.1.5.1 Temperatura do ar	92
4.3.1.5.2 Temperatura de globo	93
4.3.1.5.3 Umidade relativa do ar	94

4.3.1.5.4 Velocidade do ar	94
4.3.1.6 Conclusão do cenário 1	96
4.3.2 Resultados do cenário 2 para aquecimento passivo noturno	96
4.3.2.1 Aberturas superiores e inferiores	96
4.3.2.1.1 Temperatura do ar	96
4.3.2.1.2 Velocidade do ar	97
4.3.2.2 Coberturas	98
4.3.2.2.1 Temperatura superficial interna e externa	98
4.3.2.3 Paredes fachada norte	99
4.3.2.3.1 Temperatura superficial interna e externa	99
4.3.2.4 Vidro	102
4.3.2.4.1 Temperatura superficial interna e externa	102
4.3.2.5 Tripés	102
4.3.2.5.1 Temperatura do ar	102
4.3.2.5.2 Temperatura de globo	103
4.3.2.5.3 Umidade relativa do ar	104
4.3.2.5.4 Velocidade do ar	105
4.3.2.6 Conclusão do cenário 2	106
4.3.3 Resultados do cenário 3 para arrefecimento passivo diurno	106
4.3.3.1 Abertura superior e inferior	107
4.3.3.1.1 Temperatura do ar	107
4.3.3.1.2 Velocidade do ar	108
4.3.3.2 Coberturas	108
4.3.3.2.1 Temperatura superficial interna e externa	108
4.3.3.3 Paredes fachada norte	109
4.3.3.3.1 Temperatura superficial interna e externa	109
4.3.3.4 Vidro	110

4.3.3.4.1 Temperatura superficial interna e externa	110
4.3.3.5 Tripés	110
4.3.3.5.1 Temperatura do ar	110
4.3.3.5.2 Temperatura de globo	111
4.3.3.5.3 Umidade relativa do ar	112
4.3.3.5.4 Velocidade do ar	112
4.3.3.6 Conclusões para o cenário 3	115
4.4 Dias mais frios dos cenários de aquecimento e dia mais quente do cenário de arrefecimento	115
4.4.1 Dia mais frio do cenário 1	116
4.4.1.1 Fachada norte do protótipo referência	116
4.4.1.2 Fachada norte do protótipo Trombe ou parede Trombe	117
4.4.1.3 Conclusão do dia mais frio do cenário 1	118
4.4.2 Dia mais frio do cenário 2	119
4.4.2.1 Protótipo referência	119
4.4.2.2 Protótipo Trombe	120
4.4.2.3 Comparação entre os cenários 1 e 2 para os dias mais frios do protótipo Trombe	121
4.4.3 Dia mais quente: cenário 3	122
4.4.3.1 Protótipo referência	122
4.4.3.2 Protótipo Trombe	123
4.4.3.3 Conclusões para o dia mais quente do cenário 3	123
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	125
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	126
APÊNDICE A – Arquivo Fotográfico da Pesquisa	132
APÊNDICE B – Gráficos das Medições nos Protótipos	162
APÊNDICE C – Fotos elaboradas com câmera termovisora FLIR	274
ANEXO A – Especificações dos Instrumentos de Medição	320

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A arquitetura é um instrumento à disposição do homem e do seu conforto no que diz respeito ao conforto térmico, independentemente de condições climáticas externas. Qualidade de vida e saúde são consequências do funcionamento do organismo humano com baixos índices de fadiga ou estresse (FROTA, SCHIFFER, 2012).

O clima urbano sofre alterações e interferências das construções. Estas podem ter efeitos positivos ou negativos, como é o caso, por exemplo, das ilhas de calor que contribuem para o conforto térmico em locais de clima frio, sendo indesejável em climas quentes. Não é possível projetar desconsiderando o clima. A relação clima urbano–projetar–construir é interdependente e delimitadora.

Vive-se uma busca contínua e crescente de consciência ambiental, desencadeada pela crise mundial do petróleo na década de 1970, que envolveu todas as áreas, com diversos graus de comprometimento e responsabilidade, no que diz respeito à sobrevivência do ser humano no planeta Terra. Essa crise provocou reflexão sobre a utilização dos recursos naturais. Da área da arquitetura, representada pelos arquitetos e suas produções, destacou-se a responsabilidade sobre a distância, ou mesmo o rompimento, existente entre a arquitetura e o clima. Gonçalves e Bode (2015) colocam que, sob esse aspecto, a crise do petróleo, também conhecida como choque do petróleo, gerou, da mesma forma, um choque na arquitetura, nos seus padrões de projeto, na sua forma de projetar e no papel da sua responsabilidade diante do cenário energético mundial. O reconhecimento de questões energéticas, da exploração dos recursos naturais finitos, tornou-se fundamental para o planeta e, conseqüentemente, para os projetos de arquitetura. Essa consciência estimulou ações imediatas tanto das administrações públicas quanto da iniciativa privada, provocando, assim, a adoção de condutas comportamentais em prol de um consumo consciente a partir do indivíduo. Na arquitetura, especificamente, impulsionou o que foi

chamado de arquitetura solar. Postura projetual que se propõe a incorporar a energia solar nas edificações, poupando o consumo de energia convencional. Renasce uma arquitetura preocupada com a integração do clima local, com o conforto ambiental proporcionado pelas edificações, e atenta às consequências que a adoção desse partido acarreta ao planeta. É a Arquitetura Bioclimática. A Arquitetura Sustentável é a continuidade mais natural da Bioclimática, considerando também a integração do edifício à totalidade do meio ambiente, de forma a torná-lo parte de um conjunto maior (CORBELLÀ, YANNAS, 2003).

Fica definida a responsabilidade dos arquitetos e profissionais da área de engenharia civil na adoção de sistemas passivos para proporcionar conforto e economia dos recursos energéticos. Considerar e aproveitar a natureza dentro dessa responsabilidade tornou-se uma questão ética (CORREA, 2001).

1.2 Clima e arquitetura no Brasil

Em 2005 foi disponibilizada a NBR 15220 – Desempenho Térmico em Edificações (ABNT, 2005), direcionada para projetos de Habitações de Interesse Social no Brasil. A 3ª parte da norma, NBR 15220-3, divide o país em oito zonas climáticas distintas e orienta as diretrizes projetais e construtivas (Figura 1).

São Paulo está inserida na zona bioclimática 3 desta classificação. Sua classificação é BCFI. Para essa zona, as diretrizes construtivas recomendadas relativas à ventilação e ao sombreamento são a existência de aberturas de tamanhos médios para ventilação, a previsão de sombreamento para essas aberturas e a possibilidade da incidência do sol de inverno através delas. Quanto ao envelope, a recomendação é a especificação de paredes leves e refletoras e coberturas leves com isolamento. As estratégias de condicionamento térmico recomendadas para sua classificação são:

Estratégia para a letra B da classificação: a forma, a orientação, a implantação da edificação e a correta orientação de superfícies envidraçadas podem contribuir para otimizar o seu aquecimento no período frio por meio da incidência de radiação solar. A cor externa dos componentes também

desempenha papel importante no aquecimento dos ambientes por meio do aproveitamento da radiação solar;

Estratégia para a letra C da classificação: a adoção de paredes internas pesadas pode contribuir para manter o interior da edificação aquecido;

Estratégia para a letra F da classificação: as sensações térmicas são melhoradas por meio da desumidificação dos ambientes. Essa estratégia pode ser obtida por meio da renovação do ar interno por ar externo por meio da ventilação de ambientes;

Estratégia para a letra I da classificação: temperaturas internas mais agradáveis podem ser obtidas pelo uso de paredes (externas e internas) e coberturas com maior massa térmica, de forma que o calor armazenado em seu interior durante o dia seja devolvido ao exterior durante a noite, quando as temperaturas externas diminuem. A ventilação cruzada é obtida por meio da circulação de ar pelos ambientes da edificação. Deve-se atentar para os ventos predominantes da região e do entorno, pois o entorno pode alterar significativamente a direção dos ventos.

Figura 1 – Zoneamento bioclimático brasileiro.

Fonte: NBR 15220-3 (ABNT).

A adoção de princípios bioclimáticos proporciona a incorporação de sistemas passivos. O sistema ativo utiliza meios artificiais para transferência de calor e massa (convecção forçada do ar), enquanto os sistemas passivos recorrem aos meios naturais para aquecer ou resfriar um ambiente (MENDONÇA, 2005). Um dos sistemas solares passivos é a parede Trombe, sistema de climatização passivo que utiliza ganhos solares associados a inércia térmica. As pesquisas mostraram que o sistema é estudado e empregado na Europa, destaque para Portugal e região do Mediterrâneo, e, em menor escala, nos EUA. No Brasil, o tema foi pesquisado por Figueira et al. (2005), Vettorazzi et al. (2010), Cavalcanti et al. (2011), Suzuki (2012) e Krüger et al. (2013), descritos no segundo capítulo.

1.3 Desempenho térmico em edificações

Segundo Lamberts e Batista (2010) para avaliar o desempenho térmico de uma edificação é necessário avaliar a sua resposta física à influência do meio ambiente externo e do seu uso pelos ocupantes. A observação da variação de temperatura e umidade do ar interno ou dos fluxos de calor transmitidos principalmente através das paredes e coberturas caracteriza o comportamento térmico.

Para Siqueira et al. (2005):

A avaliação do desempenho térmico de uma edificação engloba a resposta global do projeto arquitetônico proposto em relação às trocas térmicas entre o ambiente construído e o ambiente externo, onde a caracterização das condições climáticas locais é uma das etapas mais importantes. As condições de exposição da edificação ao clima são caracterizadas pelos valores locais horários da radiação solar, da temperatura e umidade relativa do ar e também pela velocidade predominante do vento. Nos métodos de avaliação do desempenho térmico, os dados climáticos são caracterizados pelos dias típicos de projeto, para os períodos de inverno e verão. Esses dias são determinados em função de sua frequência de ocorrência e representam níveis de exigência na avaliação.

1.4 Objetivos

Esta pesquisa tem como objetivo geral a avaliação experimental comparativa por meio de medições de temperaturas superficiais, temperaturas do ar, velocidades do ar, umidades relativas do ar e temperaturas de globo realizadas em períodos característicos de inverno e verão na cidade de São Paulo.

Como objetivos específicos, a pesquisa se propõe a:

- avaliar o desempenho térmico desse sistema passivo para o aquecimento noturno;
- avaliar o desempenho térmico do sistema para arrefecimento diurno;
- contribuir com pesquisas relativas a esse tema.

1.5 Estrutura do trabalho

Este primeiro capítulo apresentou introdução, contextualização e objetivos da pesquisa.

O segundo capítulo apresenta o histórico da parede Trombe, o conceito do sistema, seu funcionamento e o estado da arte dessa tecnologia.

O terceiro capítulo descreve os procedimentos metodológicos empregados para atingir os objetivos, geral e específicos.

O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos do levantamento experimental e a análise comparativa e discussões.

No quinto e último capítulo foram expostas as considerações finais sobre a pesquisa e as sugestões de pesquisas futuras.

2 PAREDE TROMBE

O pesquisador americano Edward Morse desenvolveu e patenteou o conceito do funcionamento da parede Trombe em 1881. Os responsáveis pela sua popularização foram os franceses Félix Trombe e Jacques Michel, engenheiro

e arquiteto, respectivamente. Utilizaram-se da construção da “casa-Trombe” em Odeillo, na França, para divulgar a tecnologia, e repatentaram a ideia em 1967 (Figuras 2 e 3). A tecnologia é empregada atualmente em projetos solares passivos, sendo também conhecida como parede solar ou parede de armazenamento térmico.

Figura 2 – Imagem da parede Trombe na fachada sul da casa Trombe em Odeillo, na França.

Fonte: Google (acesso em 14/07/2015).

Figura 3 – Imagem da fachada norte e oeste da casa Trombe em Odeillo, na França.

Fonte: Google (acesso em 14/07/2015).

2.1 Conceito do funcionamento

Esta tecnologia passiva é constituída basicamente por uma parede envidraçada, uma caixa de ar e uma parede de espessura moderada, de

grande densidade, em pedra, concreto, argila ou adobe, para garantir uma boa inércia térmica. É um sistema que tem a capacidade de absorver e armazenar energia solar durante o dia, pela inércia térmica da parede, e promover sua liberação interna durante o período noturno. É um sistema solar de ganho indireto conhecido como parede Trombe clássica (Figura 4).

Figura 4 – Corte esquemático da parede Trombe clássica.

Fonte: Sá, 2011.

Para o hemisfério sul deve ser direcionada preferencialmente para o norte, orientação solar de maior desconforto térmico no verão. Essa orientação deverá ser revista em locais de baixa latitude, pois a trajetória do sol nessa época é voltada para o sul.

Novas configurações foram derivando do modelo clássico descrito anteriormente, por meio da incorporação de elementos ou no emprego de componentes modificativos, na busca de maior eficiência e abrangência quanto à utilização. Uma dessas intervenções foi o acréscimo de aberturas para a ventilação. Essas aberturas, denominadas neste trabalho de saída de ar superior (b) e entrada de ar inferior (g) na caixa de ar (d), possibilitaram condições de arrefecimento para o clima quente e promoveram a maximização dos ganhos solares para o clima frio (Figura 5). O desempenho do sistema pode diminuir em cerca de 40% se não houver aberturas voltadas para o

interior (BALCOMB, 1998) na situação de aquecimento do ambiente interno no inverno.

Segundo Fang e Yang (2008), existem duas categorias de fatores que podem influenciar a eficiência das paredes Trombe. A primeira diz sobre os parâmetros de projeto, como sombreamento, orientação solar, isolamento, envidraçamento, configurações da parede e propriedades térmicas, e a segunda diz respeito às condições climáticas, principalmente a radiação solar e a temperatura ambiente.

Figura 5 – Corte esquemático da parede Trombe clássica com ventilação.

Fonte: A autora, 2015.

2.1.1 Processo de funcionamento

O processo de funcionamento da parede Trombe é simples. A radiação solar incide sobre o vidro (e) da caixa de ar (d) e as ondas curtas que ultrapassam o vidro aquecem a superfície externa da parede de massa ou acumuladora ou térmica (c). O aquecimento da parede de massa proporciona a liberação de calor na superfície oposta da incidência da radiação solar e para a caixa de ar. A elevação da temperatura interna da caixa é decorrente do “efeito estufa”.

A capacidade de absorção e emissividade da parede de massa potencializa o efeito estufa na medida em que o calor emitido por radiação pela parede acumuladora não retorna ao meio exterior através do vidro. Para o aquecimento do ambiente interno, o calor acumulado pode ser liberado para o interior da edificação através das aberturas de ventilação (a) e (f), é a chamada termo circulação (Figura 6).

Figura 6 – Corte esquemático do funcionamento da parede Trombe para o aquecimento no período de inverno.

Fonte: A autora, 2015 (adaptado de Chel et al., 2008).

Para proporcionar o arrefecimento no interior, o calor é liberado para o meio externo através da caixa de ar, por efeito chaminé, quando estiverem abertas a saída de ar superior (b), a abertura de ventilação inferior da parede de massa e a abertura de ventilação na parede oposta à da parede Trombe, que, no caso da ilustração, encontra-se na porta (Figura 7).

Figura 7 – Corte esquemático do funcionamento da parede Trombe para o arrefecimento no período de verão.

Fonte: A autora, 2015 (adaptado de Chel et al., 2008).

A massa térmica da parede armazena a energia durante a incidência da radiação solar, promovendo um aquecimento passivo. A utilização desse aquecimento juntamente com a ventilação pode proporcionar condições de aquecimento ou arrefecimento passivo no interior, dependendo da opção

escolhida e utilizada dentre as combinações possíveis de manuseio das aberturas do sistema. O aquecimento do ambiente interno por meio da liberação da energia acumulada ocorre por convecção e radiação.

2.1.2 Componentes da parede Trombe

A otimização do desempenho da parede Trombe está relacionada aos seus componentes e seus dimensionamentos. São de importância também o conhecimento das características climáticas do local de implantação e a capacidade de armazenamento térmico da parede de massa, juntamente com a espessura ideal necessária para a defasagem entre a acumulação e a liberação de calor. A transmissividade e a condutividade térmica do vidro são relevante, pois este é o material responsável pelo “efeito estufa”. As dimensões da caixa de ar permitem o cálculo da quantidade de ar aquecido disponível para o aquecimento interno ou liberado para o exterior para o arrefecimento. Para que o sistema de ventilação seja eficiente, é necessário que as dimensões das aberturas sejam adequadas e suas localizações sejam estratégicas. O conhecimento sobre esses componentes, suas características, inter-relações e comportamentos possibilita um melhor desempenho do sistema passivo.

2.1.2.1 Parede de massa

Também conhecida como parede acumuladora ou parede térmica, tem na inércia térmica uma das características mais importantes do sistema passivo. É a propriedade responsável pela promoção do armazenamento de calor para posterior liberação, consequência da sua massa térmica. Quanto maior massa térmica, mais calor armazenado. As inércias térmicas dos materiais utilizados nas edificações podem contribuir com o conforto térmico interno e com as reduções de custos de energia. São importantes, pois permitem interferir no controle das flutuações da temperatura.

Uma parede de massa térmica elevada é funcional em sistemas passivos de aquecimento quando é estabilizadora das temperaturas interiores, isto é, quando apresenta alta capacidade de armazenamento de calor, condutibilidade térmica moderada, para permitir a transferência do calor para o interior, e emissividade elevada.

Com respeito às características térmicas, devem-se considerar quatro propriedades físicas dos materiais: a densidade ou massa volumétrica, a condutibilidade térmica, o calor específico e a capacidade calorífica. Por meio da densidade é possível saber o grau de concentração de massa em um determinado volume; a condutibilidade térmica indica a capacidade dos materiais para conduzir o calor; o calor específico define a variação térmica de um material ao receber uma determinada quantidade de calor; e a capacidade calorífica possibilita determinar a quantidade de calor necessário para promover uma variação de temperatura em um material. Considerando essas propriedades físicas dos materiais e a importância da atuação da parede de massa do sistema Trombe, é possível indicar a pedra, o concreto, o tijolo maciço e o adobe como materiais recomendados para compor uma parede de massa. Uma contribuição para a absorção de calor de um material é a utilização de cor e textura na superfície exposta. Algumas cores permitem maior absorção do que reflexão da radiação solar que outras. Uma superfície pintada de preto absorve mais calor que uma pintada de branco. O aumento de absorção pode contribuir com um aumento de temperatura interna em casos de aplicações em fachadas ensolaradas. A massa térmica é utilizada como tecnologia de aquecimento passivo, podendo, no entanto, ser empregada para o arrefecimento quando estiver associada a recursos de ventilação que permitam a dissipação do calor.

A temperatura e a radiação solar incidente sobre o sistema Trombe são fatores que influenciam a transmissão do calor através da parede de massa. Por serem oscilatórios, podem proporcionar tanto o aumento como a redução das temperaturas superficiais e interferir no fluxo de calor. É possível ocorrer, principalmente à noite, uma inversão do fluxo de calor, passando a ser efetuado de dentro para fora, situação indesejada quando se busca o aquecimento interno da edificação.

Para a eficiência e contribuição do aproveitamento da inércia térmica dos materiais, é recomendável a adoção de soluções passivas como a implantação e orientação solar da edificação, a localização e dimensionamento da área envidraçada, os recursos de sombreamento e a ventilação natural. Para o aquecimento é desejável a melhor exposição solar durante baixas temperaturas, e para os períodos mais quentes, essa situação deverá ser evitada.

A vegetação com plantas caducas pode ser uma maneira de obstrução de incidência solar.

A espessura e o volume do material da parede de massa são importantes na medida em que influenciam o valor e a flutuação das temperaturas interiores. O tempo de liberação do calor depende da capacidade térmica do material e da sua condutividade térmica. Equívocos na especificação do material da massa térmica podem ocasionar liberação interna de calor no verão ou a liberação da energia armazenada para o meio externo em períodos de baixas temperaturas.

2.1.2.2 Vidro

O uso do vidro no sistema Trombe melhora o desempenho térmico da parede acumuladora, pois permite a entrada e a conservação do calor na caixa de ar, além de impedir que o calor se dissipe facilmente para o exterior. A caixa de ar é constituída pela distância entre o vidro e a parede acumuladora, é o local onde ocorre o fenômeno do efeito estufa. É uma configuração de sistema solar passivo de ganho indireto. O efeito estufa é importante por sua capacidade de reter o calor resultante da radiação solar incidente. Características como tipo e espessura de vidro, localização e orientação solar no envelope da edificação são especificações que interferem no efeito estufa. Variações nessas características promovem maior ou menor contribuição desse efeito. O envidraçamento no envelope de uma edificação pode tornar os ambientes internos muito quentes ou muito frios.

A escolha do vidro adequado deve considerar seu desempenho quanto à transferência de calor e à quantidade de transmissão e absorção de energia

proveniente do sol. Da radiação incidente sobre o vidro, uma parte é transmitida para o interior, outra é refletida para o meio externo e a parcela final é absorvida. A quantidade de cada uma dessas parcelas em relação à radiação solar total representa propriedades ópticas do vidro. São os coeficientes de transmissão, reflexão e absorção, respectivamente. O fluxo de calor através do vidro ocorre por condução, convecção e radiação. Quanto maiores as diferenças de temperaturas entre o meio interior e o exterior, maior o fluxo, que fluirá da maior temperatura para a menor. Utiliza-se o coeficiente de transmissão térmica, expresso em $\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$, para quantificar os três mecanismos de transferência. A resistência térmica é o parâmetro inverso ao coeficiente de transmissão térmica, ou seja, onde houver maior resistência térmica, haverá menor transferência de calor. A especificação adequada do vidro influencia diretamente na quantidade de radiação solar absorvida. Fator solar de um vidro é o coeficiente que estabelece a relação entre a energia solar transmitida para o interior através do vidro e a energia solar incidente. Quanto menor o fator solar, menores os ganhos solares obtidos. Para um sistema solar passivo de aquecimento, o fator solar deverá ser elevado.

É necessário considerar a trajetória do sol, pois o ganho solar pelo envidraçamento depende do ângulo de incidência dos raios solares. Quando a incidência é perpendicular ao vidro, há uma redução nas quantidades refletidas. A reflexão aumenta na proporção do aumento do ângulo de incidência. O ângulo de incidência que permite total reflexão é de 87° (SÁ, 2011). O efeito estufa proporcionado pelo envidraçamento constitui o coletor térmico de uma edificação.

2.1.2.3 Caixa de ar

A caixa de ar é um dos componentes responsáveis pela eficiência do sistema Trombe. Sua espessura e altura, o tipo de superfície externa da parede de massa e o envidraçamento interferem nas temperaturas internas da caixa, no calor armazenado pela parede de massa e nas temperaturas liberadas para o interior. A espessura da caixa de ar influencia a transmissão de calor para o

interior da edificação tanto pela condução, através da parede acumuladora, quanto pela convecção, pelas aberturas de ventilação. Essa espessura deve ser calculada de maneira que permita o aumento da quantidade de calor acumulado e, ao mesmo tempo, a diminuição das perdas de calor. A altura da caixa tem influência direta na circulação e na velocidade do ar. Pela contribuição à absorção de calor deve-se considerar também a rugosidade da superfície externa da parede de massa e a sua cor. Parte do calor armazenado na caixa de ar é perdida para o meio externo através do vidro. Quanto mais elevadas as temperaturas na caixa de ar, maiores serão as perdas.

2.1.2.4 Ventilação

É a presença de sistema de ventilação nesta tecnologia que faz o sistema ser conhecido como parede Trombe ventilada e proporciona novos recursos em relação ao sistema não ventilado. As aberturas podem estar localizadas somente na parede de massa ou também na face externa da caixa de ar, no plano envidraçado. Na parede ventilada o aquecimento ou arrefecimento ocorre por convecção do ar através das aberturas de ventilação da parede acumuladora.

As aberturas de ventilação da parede de massa contribuem para a redução de perdas de calor da caixa de ar através do vidro. Com o aumento da temperatura na caixa de ar, o calor passa para o ambiente interno através da abertura de ar superior e o ar mais frio deixa o ambiente através da abertura de ventilação inferior, para a caixa de ar. Fica estabelecido o movimento de ar conhecido por termo circulação. O recurso do fechamento das aberturas de ventilação é uma possibilidade de garantir temperaturas de conforto na hipótese de um sobreaquecimento durante o dia ou de um arrefecimento durante a noite.

As entradas e saídas de ar instaladas no vidro da caixa de ar são os dispositivos que permitem a ventilação para o exterior, promovendo o arrefecimento interno. O dimensionamento das aberturas de ventilação e suas localizações são fatores condicionadores de fluxo de calor.

2.2 O estado da arte

Várias pesquisas foram realizadas para investigar e entender como essa tecnologia pode contribuir com o desempenho térmico das edificações. Foram estudados e analisados 50 artigos científicos relativos à parede Trombe, dos quais cinco são artigos brasileiros. Desse montante, 22 concentraram-se no aquecimento, 13 no aquecimento e arrefecimento, dois somente no arrefecimento e 13 em assuntos gerais que envolvem ou dizem respeito à parede Trombe de uma maneira genérica. As sínteses desses artigos estão propositalmente citadas em ordem cronológica, da mais antiga para a mais nova, para possibilitar uma compreensão do processo evolutivo dessas pesquisas. Essa sequência cronológica, além de esclarecer a evolução das pesquisas, possibilita uma conotação qualitativa sobre o desenvolvimento do tema.

2.2.1 O estado da arte no mundo

Tasdemiroglu et al. (1983) estudaram a atuação desse sistema passivo nas condições climáticas do Mar Egeu. Compararam duas residências idênticas, ambas faces sul, em Marmaris, na Turquia. A parede Trombe foi inserida em uma delas e mostrou que, para ambientes sem isolamento especial e em alguns meses do ano, de 15 a 35% da radiação solar recebida da parede de acumulação térmica foram transferidos para o interior. Essa porcentagem variou de 8 a 19% na unidade sem a tecnologia solar. Concluíram que, em regiões de clima semelhante, a técnica pode ser adotada para minimizar o sobreaquecimento, que a construção e manutenção desse sistema passivo é mais simples do que qualquer outro sistema de aquecimento. Confirmaram também a eficiência da operação desse sistema passivo para o aquecimento.

Amato et al. (1984) discutiram a possibilidade de economia de energia por meio da utilização de elementos solares passivos e de controle térmico. Utilizaram o programa computacional CASA, que usa como base a equivalência de elementos térmicos e elementos elétricos. O programa assume que o sistema de aquecimento funciona de modo a manter a temperatura interna constante e

uniforme no interior do edifício. Para satisfazer esse parâmetro, o calor emitido pelo sistema de aquecimento deve ser controlado considerando a temperatura de ar externa. Concluíram que o controle do sistema de aquecimento pode gerar uma economia significativa nas despesas para o aquecimento. Quanto ao programa, acrescentaram que é capaz de simular casos complexos, como os efeitos do controle térmico ou dos sistemas solares passivos, incluindo paredes Trombe, e que possibilita a execução de análises tanto do potencial para o aquecimento no inverno como para o arrefecimento no verão. Pode ser, também, uma ferramenta adequada para comparar os efeitos de diferentes operações em políticas de poupança de energia. Permite avaliar a economia decorrente da arquitetura solar passiva adotada e estimar os efeitos locais de elementos passivos com o objetivo de evitar temperaturas desconfortáveis.

Yedder e Bilgen (1991) estudaram numericamente o desempenho térmico da parede Trombe clássica (Figura 8). Consideraram, para tanto, a convecção natural nesses sistemas utilizando limitações e condições de operações reais, como as aberturas das ventilações em tamanhos adequados, a condutividade das paredes e o fluxo constante de calor na superfície da parede acumulativa. Examinaram os efeitos de parâmetros geométricos, como o tamanho das aberturas, as distâncias a partir das superfícies horizontais que as delimitam, a medida entre a parede acumulativa e a parede oposta no ambiente interno, e os efeitos da condutividade na parede acumulativa. Constataram que dois parâmetros importantes afetam a transferência de calor: a diferença de temperatura ΔT ($T_2 - T_1$) e o número de Rayleigh. Para se obter uma energia útil a partir do sistema solar coletor, o ΔT deve ser positivo. Caso seja negativo, o fluxo de calor a partir da parede acumulativa deverá ser maior do que um valor limite – número de Rayleigh. Observaram, também, que os sistemas sem aberturas são melhores do que aqueles com aberturas durante as horas de insolação e mais eficientes quando a condutividade da parede é alta.

Figura 8 – Representação dos parâmetros geométricos e sistema de coordenadas.

Fonte: A autora, 2015 (adaptado de Yedder e Bilgen, 1991).

Gan (1997) realizou um estudo paramétrico das paredes Trombe para o arrefecimento de edifícios no verão (Figura 9). Usou programa CFD (*computational fluid dynamics*) para prever taxas de ventilação resultantes do resfriamento natural. Adotou o modelo de turbulência RNG $k-\varepsilon$ para prever fluxo de ar flutuante e vazão em recintos com geometrias da parede Trombe. Validou o programa CFD utilizando dados da literatura e alcançou uma boa relação entre a previsão e a medição. O estudo confirmou a utilização do código de computador desenvolvido para a previsão de fluxo de ar flutuante e a vazão em ambientes com parede Trombe. A taxa de ventilação prevista aumentou com a temperatura da parede e o ganho de calor. Investigou os efeitos da distância entre a parede acumulativa e o vidro, altura da parede, tipo de vidro e isolamento das paredes. Verificou que, para o arrefecimento de verão, a taxa de ventilação induzida aumenta com a temperatura da parede, com o ganho de calor solar e com maiores alturas e espessuras da parede. A taxa de fluxo de ar aumenta conforme o aumento da espessura da caixa de ar, desde que as dimensões das aberturas de entrada e de saída também aumentem. O uso de vidros duplos na caixa de ar reduz as perdas de calor da edificação no inverno,

mas aumentam a refrigeração passiva no verão. O uso de isolamento na face interna da parede acumulativa maximiza a taxa de ventilação, favorecendo o arrefecimento no verão, e previne o superaquecimento da edificação. O autor concluiu que, para fins únicos de resfriamento passivo, a chaminé solar é preferível à parede Trombe.

Figura 9 – Diagrama esquemático da parede Trombe para aquecimento no inverno e arrefecimento no verão, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015 (adaptado de Gan, 1998).

Buzzoni et al. (1998) buscaram uma solução numérica para o problema de convecção natural relativo à utilização de sistema passivo de energia solar para aquecimento. O sistema foi constituído a partir de uma modificação do sistema conhecido como Trombe-Michel (Figura 10). As principais diferenças foram o isolamento térmico da superfície da parede sul, a presença de dois coletores solares separados por uma placa metálica fina com função coletora e o armazenamento térmico no teto ao longo dos ambientes aquecidos, conhecido como sistema Barra-Costantini. Para determinarem o perfil da temperatura em função do tempo em cada um dos componentes do sistema e o padrão do fluxo de ar nos dutos solares, utilizaram-se do método de diferença finita, modelo matemático formado pelas equações governantes do problema. Este trabalho

baseou-se em equações de conservação de massa e representou a primeira contribuição na análise e modelagem desse sistema. Equações diferenciais foram resolvidas considerando as condições das limitações complexas e da geometria. Os resultados dizem respeito a um sistema passivo de aquecimento de um edifício em Roma, na Itália. Foi experimentalmente medido e registrado o desempenho do sistema, da radiação solar e da temperatura ambiente. Concluíram que, apesar de o sistema Barra-Costantini permitir a obtenção de um ganho de energia notável, é pouco utilizado, pois exige uma arquitetura peculiar e um investimento alto.

Figura 10 – Representação gráfica do fluxo de ar no sistema Barra-Costantini.

Fonte: A autora, 2015 (adaptado de Buzzoni et al., 1998).

Zalewski et al. (2002) apresentaram neste artigo o princípio e parte dos resultados relativos à validação de um modelo de simulação da operação térmica das paredes solares. Para validarem o modelo, executaram um estudo experimental de aproximadamente três anos sobre uma parede Trombe composta construída em Cadarache, sul da França, a parede Trombe-Michel. O modelo foi utilizado para estudar o efeito dos parâmetros dos projetos ou novos materiais e para comparar os diferentes tipos de parede Trombe. Foi

utilizado para estudar a eficiência energética das paredes solares em diferentes localizações e em condições climáticas diversas. Analisou-se de que maneira ocorre a liberação do fornecimento de energia e como ocorre seu desempenho, particularmente durante o verão, para evitar a sobrecarga.

Em Nicósia, no Chipre, Kalogirou et al. (2002) investigaram os efeitos da utilização de paredes de massa térmica em edificações. O objetivo principal da pesquisa concentrou-se nos possíveis benefícios decorrentes dessa tecnologia passiva. A modelação e simulação utilizou o programa TRNSYS sobre um modelo de residência típica, em que o telhado era isolado e a fachada sul convencional foi substituída por uma parede solar. A casa modelo foi dividida em quatro zonas iguais (Figuras 11 e 12).

Figura 11 – Representação gráfica da planta da residência modelo.

Fonte: A autora, 2015 (adaptado de Kalogirou et al., 2002).

Figura 12 – Representação gráfica do corte da residência modelo.

Fonte: A autora, 2015 (adaptado de Zalewski et al., 2002).

Foram investigadas as possibilidades de sombreamento na parede acumulativa e maneiras de ventilar a caixa de ar para o verão. O resultado da simulação mostrou que houve uma redução de cerca de 47% da necessidade de carga para o aquecimento, mas ao mesmo tempo houve um aumento de aproximadamente 4,5% na necessidade de carga para o arrefecimento, apesar da utilização do sombreamento. Concluíram que, para a utilização do beiral como sombreamento, este deve ter entre 0,9 e 1,5m. Constataram a importância da parede acumulativa, confirmando, assim, a literatura existente. Propuseram o valor ideal de 25 cm para esse parâmetro.

Chen et al. (2006) realizaram estudos sobre o desempenho térmico da parede Trombe utilizando dispositivo de sombreamento na caixa de ar, em Dalian, na China. O levantamento experimental foi executado em uma noite de inverno e mostrou que desempenha um papel importante (Figura 13). O desempenho foi investigado considerando as temperaturas simultâneas e o ganho e aquisição de calor pela parede Trombe. Concluíram que o uso do sombreamento pode diminuir a perda de calor por convecção da caixa de ar, evitando, assim, a transferência de calor da parede Trombe para o exterior por radiação e contribuindo com o desempenho térmico do sistema.

Figura 13 – Vista da fachada sul da sala teste (direita) e da sala referência (esquerda).

Fonte: Chen et al., 2006.

Shen et al. (2007) estudaram o desempenho térmico de dois sistemas solares passivos, a parede Trombe clássica e a parede composta Trombe-Michel. Os modelos foram desenvolvidos com o Método de Diferenças Finitas (MDF), validado por experimentação de Zalewski et al. (2002), e utilizou-se o software de modelagem TRNSYS. Utilizaram dados meteorológicos da cidade de Carpentras no sul da França. Foram feitas comparações entre os resultados dos dois modelos. Concluíram que a parede Trombe clássica tem a simplicidade como vantagem e a baixa resistência térmica como desvantagem. Quando a energia solar recebida pela parede maciça é reduzida, parte do fluxo de calor é transferida do interior para o exterior, resultando em perda de calor do edifício, situação inadequada para regiões de clima frio e/ou de elevada altitude. A solução pode ser o uso da parede Trombe-Michel, pois utiliza uma camada isolante. Para calcular com precisão a capacidade de armazenamento e de recuperação da energia solar para esse tipo de parede, recorreram às ferramentas de simulação do programa TRNSYS. Estudaram facilmente a parede Trombe clássica, mas precisaram elaborar novos componentes de simulação para estudar a parede Trombe-Michel (Figuras 14 e 15). Utilizaram os dados meteorológicos da cidade de Carpentras, no sul da França. Os

parâmetros da parede composta foram baseados em estudos experimentais da literatura. Na primeira parte do trabalho os resultados obtidos mostraram discrepâncias importantes em determinadas grandezas, e essas discrepâncias mostraram a necessidade de realizar novos estudos experimentais. Após criarem um novo modelo no TRNSYS para a parede solar composta, fizeram a comparação entre os resultados da simulação com o método das diferenças finitas, validando a experimentação. Os resultados concluíram que, com a ferramenta de simulação, tornou-se possível estudar os desempenhos e o cálculo do balanço energético da parede composta Trombe-Michel em comparação com paredes clássicas Trombe em diferentes condições de uso. Mostraram a precisão dos modelos desenvolvidos na pesquisa e que a parede composta apresenta melhores desempenhos energéticos que a parede clássica em condições de frio e/ou tempo nublado.

Figura 14 – Representações gráficas do corte da parede Trombe (esquerda) e da vista da parede Trombe (direita).

Fonte: A autora, 2015 (adaptado de Shen et al., 2007).

Figura 15 – Representações gráficas do corte da parede composta Trombe-Michel (esquerda) e da vista da parede composta Trombe-Michel (direita).

Fonte: A autora, 2015 (adaptado de Shen et al., 2007).

Chel et al. (2008) investigaram neste estudo a conservação de energia, a redução de CO₂ e a economia na adaptação de uma edificação de armazenamento de mel, localizada em Gwalior, na Índia, utilizando a parede Trombe para o aquecimento no inverno. A temperatura ambiente adequada para o armazenamento do mel é acima de 18°C e abaixo de 30°C. O potencial de aquecimento passivo da parede Trombe para o edifício de armazenamento de mel foi estudado por meio do programa de simulação de construção TRNSYS. Os resultados indicaram que a temperatura do ambiente pode ser mantida no intervalo adequado para o armazenamento de mel usando a parede Trombe ventilada. Executaram um trabalho experimental para validar os resultados do modelo TRNSYS. A análise estatística dos erros mostrou uma boa concordância entre o modelo e os resultados experimentais. Da investigação concluíram que, além do potencial de conservação de energia e, consequentemente, da redução de CO₂ associada, a adaptação da edificação

é economicamente viável e a intervenção apresentou um retorno do investimento em sete meses.

Fang e Yang (2008), pesquisadores chineses da cidade de Nanjing, buscaram uma nova abordagem para orientar projetos com aquecimento solar passivo e, assim, possibilitarem o estudo da análise de sensibilidade das paredes de aquecimento solar. A sensibilidade da parede de aquecimento solar é a condição que esta tem de receber, armazenar e transferir energia solar para a edificação. Até então a análise era feita por simulações numéricas. Desenvolveram um modelo de regressão geral que foi validado por meio de um estudo de caso. Foram construídas quatro células lado a lado em Beijing, na China, para obter dados experimentais (Figura 16). A validação da análise de regressão constatou que o modelo é altamente confiável.

Figura 16 – Foto das 4 células construídas.

Fonte: Fang e Yang, 2008.

Yilmaz e Kundacki (2008) propuseram a aplicação, e posterior estudo, da parede Trombe sem ventilação e com janelas, na Turquia. Foi escolhida uma edificação com orientação solar face sul para receber o sistema passivo. Foram feitas comparações entre os desempenhos térmicos antes e após a inserção da tecnologia. Os cálculos foram realizados com programas de computador. O estudo foi realizado para o aquecimento no inverno e concluiu-se que a

inserção da parede Trombe trouxe um desempenho térmico significativo, podendo contribuir com a economia de energia.

Nwachukwu e Okonkwo (2008) buscaram a melhoria da transferência de calor, por uma parede Trombe, por meio da análise dos efeitos dos valores de absorção de calor dos revestimentos. O objetivo foi melhorar a dissipação de calor para o ambiente interno durante o período noturno. Verificou-se que a aplicação de materiais de revestimentos de elevada absorvidade e baixa emissividade sobre a superfície de recepção da parede pode ser uma técnica de realce de transferência de calor.

Kisilewicz (2009), pesquisador polonês, comparou a utilização do sistema direto e indireto para o aquecimento em edificação com fachada de vidro do ponto de vista econômico. Os ganhos solares do sistema direto, através de janelas, ficam muito próximos dos ganhos do sistema solar indireto, por meio de parede solar. Salientou que a vantagem principal do sistema indireto é a redução significativa de risco de sobreaquecimento no inverno e no verão. A comparação entre os dois sistemas, utilizando o consumo de energia combinado com critérios de custos de investimentos, indicou que o uso de sistema de ganhos de energia direto é mais racional que o indireto.

Zhu et al. (2008) compararam o desempenho entre duas casas inicialmente idênticas, em Las Vegas. Uma delas sofreu algumas intervenções com tecnologias passivas para o aquecimento, a parede de massa foi uma delas. Utilizando medições do comportamento, foram efetuadas comparações entre as duas unidades visando o desempenho. Análises econômicas foram executadas para os recursos de economia de energia, utilizando o consumo anual de energia como referência. Uma das conclusões foi que as paredes de massa térmica são muito caras para serem produtos competitivos no mercado.

Ruiz-Pardo et al. (2008), espanhóis, fizeram uma revisão na norma ISO 13790:2008 para verificar os modelos matemáticos propostos e sua aplicação

no clima mediterrâneo. A norma apresenta um conjunto de métodos de cálculo para a avaliação do desempenho térmico dos edifícios e execução de projetos. Detectaram erro na equação que define o aumento da transmissão térmica devido ao fluxo de ar, influenciando significativamente em outras equações e resultados nos casos de parede Trombe. Desenvolveram uma equação para os cálculos de ganhos solares. As correções executadas acarretaram novas correlações para a proporção δ e ω ; a primeira diz respeito à diferença de temperatura interna-externa e a segunda, à radiação solar, ambas com a ventilação em funcionamento. O uso dessas novas correlações é especialmente indicado para locais de clima quente, como os da região do Mediterrâneo, com altos índices de ganho/perda dentro da camada de ar.

Ryan e Burek (2010), pesquisadores escoceses, relataram experiências com equipamentos de teste que se assemelham com coletores solares passivos de aquecimento de ar, como chaminés solares e paredes Trombe. Concluíram que a eficiência térmica está relacionada à entrada de calor e à altura do sistema, mas não à profundidade da caixa de ar, e que o fluxo de massa é dependente desses três parâmetros.

Chan et al. (2010), pesquisadores da Universidade de Nottingham no Reino Unido, fizeram uma revisão das tecnologias solares passivas para aquecimento e arrefecimento considerando os mecanismos de trabalho, isto é, os efeitos da flutuabilidade e da evaporação. Destacaram as vantagens, as limitações e os desafios dessas tecnologias. Da parede Trombe clássica apontaram como desafios a baixa resistência térmica, a possibilidade de ocorrer o fenômeno de inversão térmica durante o inverno, a incerteza da transferência de calor devido ao movimento de ar em ambientes aquecidos por energia solar, o comprometimento do desempenho de aquecimento global por influências da espessura da caixa de ar e das aberturas de ventilação e, por último, o baixo valor estético do sistema.

Sun et al. (2011) fizeram estudos experimentais e numéricos para investigar o desempenho de paredes Trombe ventiladas com painel fotovoltaico (PVTW) em diferentes fachadas orientadas para o sul. O único dado da localização do experimento citado no artigo é latitude de $37,86^\circ$. A partir de simulações numéricas, verificaram que a orientação para a fachada sul influencia a eficiência térmica das PVTW e que a utilização de janelas pode contribuir com o aquecimento para o ambiente interno, mas pode reduzir a eficiência térmica de uma PVTW em 27%. A utilização de painéis fotovoltaicos sobre o vidro da caixa de ar pode reduzir a eficiência térmica da parede Trombe em até 17%. O trabalho foi financiado pela Fundação de Ciência Natural da província de Anhui, na China.

Sadeneni et al. (2011), pesquisadores da Universidade de Nevada em Las Vegas no Estados Unidos da América, fizeram uma avaliação técnica dos componentes que envolvem as fachadas das edificações com eficiência energética e as perspectivas de poupança. A parede Trombe foi uma das estudadas. Apontaram a necessidade de uma compreensão mais ampla dos fatores climáticos pelos projetistas, uma vez que as eficiências energéticas passivas são altamente sensíveis aos fatores meteorológicos. Concluíram que a aplicação de massa térmica, como economia de energia e eficiência térmica, é mais eficaz em locais onde as amplitudes das temperaturas do ar são mais elevadas, entre os dias e as noites. As escolhas das melhores opções de eficiência energética, para determinada localização, podem ser consequência da busca de códigos computacionais de modelagem. Mencionaram as necessidades de execução de avaliações periódicas nas fachadas, do ponto de vista da eficiência energética, e das manutenções destas para conservação, procedimentos que podem contribuir muito para alcançar o melhor desempenho energético e prolongar a vida das fachadas.

Jaber e Ajib (2011) estudaram neste trabalho os impactos térmicos, ambientais e econômicos do sistema Trombe para edificação residencial na região do Mediterrâneo. Buscaram o tamanho ideal desse sistema usando como critério o Custo do Ciclo de Vida (LCC). Utilizaram o programa TRNSYS para analisar o

desempenho e, a partir dessa análise, montaram equações econômicas de LCC e otimizaram a proporção da área de parede Trombe em função dos parâmetros econômicos e térmicos. Essa relação ficou em 37% e proporcionou uma redução do LCC e da emissão de CO₂.

Ferreira e Pinheiro (2011) apresentaram, por meio deste artigo, a análise comparativa da aplicação do sistema de certificação energético Português EPBD com as normas Passivhaus aplicadas para o aquecimento em países da Europa. A Diretiva de Desempenho Energético dos Edifícios (EPBD) é uma importante ferramenta de política europeia para melhorar o desempenho energético dos edifícios. É aplicada em 27 países, com adaptações específicas. Essa análise foi baseada em um estudo de caso com três tipologias residenciais localizadas em três diferentes zonas climáticas portuguesas. Foram consideradas várias soluções alternativas e complementares que envolvem valores de regulamentação do envelope, isolamento térmico interior e exterior, menor taxa de renovação do ar, luzes coloridas nas paredes externas, melhor sistema de envidraçamento, elementos de sombreamento e uma parede Trombe. Salientaram a necessidade da revisão das normas em face da facilidade com que foram atingidas as metas dos edifícios passivos. Como resultado, concluíram que, como os máximos reais são facilmente alcançados, devem ser substancialmente reduzidos por zona climática. Os valores de referência da regulamentação resultaram em uma redução considerável das necessidades de energia, mas não atingiram as metas da Passivhaus. A conclusão de necessidade de reformulação das normas portuguesas instigou os demais membros a reformularem seus regulamentos com o objetivo de, inicialmente, atenderem aos princípios bioclimáticos e fachadas passivas e, em seguida, complementarem a edificação com sistemas ativos eficientes em que o sistema passivo não pode ser adotado.

Zhai et al. (2011), pesquisadores da cidade de Xangai na China, discorreram em seu artigo sobre o uso das chaminés solares como uma metodologia de projeto bioclimático simples e prática. Consideraram seus benefícios em termos

de custo operacional, exigência de energia e das emissões de dióxido de carbono. O trabalho resumiu as principais configurações e sistemas de energias renováveis integradas com base nas chaminés solares, inclusive as paredes Trombe. Concluíram que podem ser amplamente utilizadas nas áreas com radiação solar adequada. É um sistema muito adequado para regiões onde a radiação solar é alta e a velocidade do vento é normalmente baixa. Em locais com clima quente e úmido, a ventilação induzida por energia solar das chaminés solares é uma alternativa viável. As chaminés solares podem ser integradas em quaisquer paredes ou telhados. Podem ser usadas em edifícios sem sistemas de climatização, para melhorar o ambiente térmico interior por ventilação natural, como também podem ser adotadas em edifícios com sistemas de ar-condicionado. Concluíram que a adoção de chaminés solares em projetos aumenta a circulação natural e, portanto, contribui com os benefícios térmicos da ventilação natural.

Hami et al. (2012), pesquisadores na Algeria, utilizaram a técnica de dinâmica de fluidos computacional (CFD) para simulação de fluxo de ar em chaminé solar. Concluíram que a temperatura nas aberturas de ventilação superiores (ar quente) depende do fluxo solar. Os resultados da simulação obtidos mostraram uma temperatura do ar bastante elevada, favorecendo o conforto térmico. Consideraram importante saber os valores da energia solar para propor o projeto arquitetônico e conhecer o material a ser utilizado na parede de massa, uma vez que este é o componente mais importante dessa tecnologia. Em paredes de armazenamento térmico ventiladas, as aberturas podem ser um mecanismo de controle importante, tanto para o aquecimento quanto para o arrefecimento. O beiral do telhado pode reduzir o ganho de calor durante os meses frios por meio do sombreamento.

Stazi et al. (2012), por meio de estudos experimentais e analíticos da atuação das paredes solares em edificação, investigaram o comportamento térmico da parede Trombe em edificação residencial no clima do Mediterrâneo. Confirmaram a eficiência do sistema sob o ponto de vista da economia de energia e do conforto térmico sob várias condições. Simulações numéricas

indicaram o melhor desempenho da parede Trombe sobre as paredes convencionais em termos de contribuição de energia, particularmente quando são utilizados vidros duplos no sistema Trombe. Recomendam o uso de proteção nas paredes solares no verão para se evitar ganhos excessivos de calor e o desconforto térmico. Paredes solares com proteção, não ventiladas, determinam a necessidade de energia para resfriamento um pouco superior em relação às paredes convencionais e apresentam alguns inconvenientes de superaquecimento durante os meses mais quentes. Constataram que a aplicação da ventilação cruzada em paredes Trombe proporciona uma atuação mais eficiente para o arrefecimento.

Zalewski et al. (2012) apresentam neste artigo um estudo experimental realizado em Béthune, norte da França, de uma parede Trombe solar composta, em que o material com mudança de fase foi inserido na forma de uma embalagem de tijolo. Esse material pode armazenar mais calor do que o mesmo volume de concreto, para o mesmo intervalo de temperatura. Uma vantagem da parede solar composta é que os ganhos solares são liberados com uma defasagem de tempo, que depende da natureza da parede do armazenamento e da sua espessura. Em trabalho anterior, o estudo do intervalo de tempo de armazenamento de parede de concreto com uma espessura perto de 15 centímetros revelou um intervalo de tempo de cerca de 6 horas. O intervalo de tempo medido para o tijolo contendo sais hidratados foi de 2 horas e 40 minutos, quase 2,5 vezes mais curto, o que pode ser uma vantagem para a instalação em locais com ocupação diurna, como escolas, escritórios ou edifícios comerciais.

Saadatian et al. (2012), pesquisadores do estado de Selangor na Malásia, analisaram neste artigo a aplicação de paredes Trombe em edifícios. Efetuaram uma discussão sobre as características, as configurações, as tecnologias do sistema e apontaram suas vantagens e desvantagens. Sobre sua eficiência, confirmaram a importância de elementos como as saídas e entradas de ar, as aberturas de ventilações e o isolamento. No que diz respeito às características intrínsecas, abordaram a importância do tamanho, da cor, a

especificação dos materiais, os materiais de revestimento e os vidros. Para a concepção da parede Trombe, assinalaram que a relação ótima entre a área de parede Trombe e a área da parede inserida é de 37%. Em relação à espessura, reconheceram ser um parâmetro que contribui com a eficiência e que está relacionado com a latitude, o clima e a perda de calor. Indicaram a espessura entre 30 e 40 cm de concreto para melhores resultados. Indicaram o uso de isolamento na superfície interna da parede de massa para se evitar o superaquecimento. Enfatizaram a importância significativa da especificação do material da parede acumuladora para o armazenamento de calor. Mencionaram sobre a conclusão de pesquisadores argelinos que consideraram a parede de massa a parte mais importante da parede Trombe clássica e que o aumento do peso e do volume promove uma capacidade maior de armazenamento das paredes, mas, em contrapartida, também aumentam a carga morta na edificação. Sinalizaram sobre a importância de estudos sobre as interferências que os materiais de revestimento acarretam sobre o desempenho global de paredes Trombe. Concluíram que os materiais de revestimento altamente absorventes melhoram a capacidade de armazenamento da parede e a eficiência do sistema. Quanto à caixa de ar, consideraram a relevância do material, da sua espessura e do número de camadas do envidraçamento. Salientaram não somente a importância e contribuição significativa do vidro na eficiência da parede Trombe, mas também que o uso de vidros duplos, de baixa emitância, favorece a absorção da energia. Dentre as desvantagens pontuadas pela equipe do Saadatian, foram enumeradas quatro significativas: a primeira diz respeito à baixa resistência térmica que pode acarretar um fluxo de calor do interior para o exterior durante a noite ou em períodos nublados; a segunda aponta sobre a possibilidade de a parede de massa ficar com a temperatura inferior à do ambiente, provocando, assim, uma retirada de calor do ambiente; a terceira tem relação com a quantidade de calor, que é imprevisível devido às alterações na intensidade de incidência solar; a quarta desvantagem diz respeito ao fator estético, sua configuração não contribui para sua utilização.

Stazi et al. (2012) apresentaram um estudo experimental sobre os parâmetros térmicos de uma parede Trombe no verão, sob condições de clima mediterrâneo. A aplicação dessa tecnologia é problemática devido aos ganhos de calor indesejados e ao fenômeno de superaquecimento no verão. Executaram um monitoramento detalhado e simultâneo de duas paredes Trombe para estudar o comportamento térmico, variando as condições de vedação, ventilação e ganhos internos. Verificou-se que o uso de persianas tem uma influência relevante nas temperaturas de superfície da parede Trombe; que a velocidade do ar, na caixa de ar, é influenciada tanto pelas condições do vento como pelas temperaturas do ar da caixa; e que o uso de persianas promove uma baixa velocidade de ar na caixa. Constataram que a pesquisa termográfica é útil para provar que a distribuição da temperatura da superfície externa da parede Trombe é bastante uniforme quando analisada a partir da radiação solar direta. A análise de conforto térmico para um período selecionado caracterizado por condições críticas de verão confirmou que o nível de conforto foi satisfatório para a casa. Por meio da simulação de energia no estado dinâmico concluíram que o uso de saliências e persianas é mais eficaz do que a ventilação cruzada na economia de energia para o resfriamento.

Stazi et al. (2012) apresentaram neste artigo uma abordagem integrada para a otimização do desempenho energético e ambiental dos envelopes de construções complexas que combinam avaliação do ciclo de vida, simulação e análise de otimização de energia com a técnica de planejamento fatorial. O desempenho ambiental foi calculado considerando a demanda de energia e as emissões de CO₂ na fase de produção e na fase operacional. Aplicou-se a metodologia a um estudo de caso exemplar com sistema de paredes solares em Ancona, na Itália. Os resultados mostraram que as paredes solares têm um elevado impacto ambiental, tanto na produção como nas fases operacionais. No processo de produção, altas cargas ambientais dizem respeito ao uso do alumínio e do concreto, enquanto, na fase operacional, as altas emissões de CO₂ e requisitos de energia estão relacionadas à necessidade do uso de energia para o arrefecimento de verão. O processo de otimização com plano

fatorial demonstrou que é possível reduzir as emissões de CO₂ e a demanda de energia de paredes solares tanto para as fases de produção como de utilização em até 55% a partir de uma configuração tradicional (camada de concreto com 40 cm de espessura, quadro em alumínio e vidros simples) para uma configuração otimizada (camada de blocos de concreto aerado com 20 cm de espessura, moldura de madeira e vidros duplos). No entanto, a escolha final deve ser baseada em diferentes objetivos ou condições estabelecidas no processo do projeto. O parâmetro que demonstrou a maior influência sobre as necessidades de energia para o resfriamento foi o tipo de vidro. O uso de vidro simples, contra os duplos, nas fachadas acarreta um uso menor de energia para a refrigeração. Confirmaram que o uso de ventilação cruzada em paredes Trombe pode reforçar o desempenho energético no verão, conforme citado em estudos anteriores.

Kundakci e Yilmaz (2012) tiveram como objetivo neste trabalho apresentar o sistema de parede Trombe com o painel fotovoltaico (PV), vidros simples e módulos de vidro duplo, e validar o modelo de simulação desses sistemas por meio de resultados experimentais. A pesquisa foi realizada em uma fachada com parede Trombe de uma sala de um modelo construído em Izmir, Turquia. Validaram o modelo de simulação após compararem os resultados experimentais e os simulados e encontrarem uma boa concordância. Verificaram que o vidro duplo tem maior caráter de isolamento durante a tarde e à noite, já o vidro simples proporciona maior ganho de radiação solar térmica para a parede durante o dia, pois tem maior transmissibilidade de radiação solar. A temperatura do ar na caixa de ar do módulo com PV foi a menor dos três módulos, pois painéis fotovoltaicos têm uma transmissibilidade inferior para radiação solar. Os resultados experimentais mostraram que o calor armazenado na parede durante o dia é transferido para o interior do ambiente à noite, e indicaram um notável aumento de temperatura no interior do ambiente. As flutuações das temperaturas observadas podem ser reduzidas por meio de manipulações de abrir e fechar das aberturas de ventilação a fim de fornecer condições de conforto.

Fares, Amina (2012), pesquisadora da Universidade de Damasco na Síria, buscou por meio da sua pesquisa fornecer a energia utilizada no aquecimento e arrefecimento das edificações e vincular soluções que proporcionem conforto térmico utilizando sistemas solares passivos. Estudou os efeitos das variações dos componentes da parede Trombe, como tipo e espessura de parede de massa térmica, relação de proporção entre a parede Trombe e a parede total que está inserida, e a quantidade de camadas de vidro. Utilizou a linguagem Java para calcular a carga térmica, o ganho solar e a energia auxiliar sobre essas alterações. Concluiu que materiais de capacidade térmica elevada apresentam alta eficiência, como a parede de tanque de água; que há um aumento dos ganhos solares totais quando a área de parede Trombe aumenta; e que o uso de paredes térmicas espessas é mais apropriado quando se deseja uma liberação de calor noturna, sendo que espessuras menores são mais apropriadas para uma liberação de calor diurna. Recomenda a utilização de sistemas passivos de aquecimento apesar do seu custo, pois há uma economia de energia e proteção do meio ambiente.

Quesada et al.(2012), da Universidade de Quebec no Canadá, buscaram neste trabalho avaliar os desenvolvimentos notáveis que ocorreram durante a primeira década deste século no que diz respeito às chamadas fachadas solares – fachadas especiais que envolvem processos de aquecimento, ventilação, isolamento térmico, proteção, geração de eletricidade e iluminação de residências. A tecnologia solar térmica integrada ao edifício foi revisada por ser uma tecnologia relativamente simples, ainda que não esteja totalmente otimizada. A revisão gerou cinco grupos de sistemas: o solar térmico, o fotovoltaico, o térmico fotovoltaico, o de armazenamento térmico e a chaminé solar. Desses sistemas, a parede de armazenamento térmico, e suas variações, se mostrou a mais desenvolvida.

Fiorito, Francisco (2012) realizou esta pesquisa para avaliar o comportamento térmico da parede Trombe integrada em construções leves. A massa pesada de armazenamento térmico foi substituída por materiais de mudança de fase (PCMs) para melhorar o desempenho térmico do sistema. Foram escolhidas

cinco cidades australianas representativas de cinco zonas climáticas diferentes. Para definir a tecnologia mais adequada para cada zona climática, foram consideradas variações nas posições dos materiais de mudança de fase e nas temperaturas do ponto de fusão. A adoção de PCMs na superfície interior pode reduzir a temperatura superficial, evitando efeitos de sobreaquecimento, causado pelos elevados ganhos solares. As variações das espessuras das PCMs podem afetar a distribuição de temperaturas tanto para dentro quanto para fora. Maiores espessuras de PCMs mostraram maiores benefícios devido ao aumento da capacidade térmica. Em qualquer área climática a adoção de PCMs foi contributiva para aumentar a defasagem entre os fluxos térmicos absorvidos e liberados, restaurando a inércia térmica das construções.

Wei et al. (2012) apresentaram e discutiram neste artigo a aplicação da energia solar passiva em residências na região do Tibet. A região tem um alto recurso de energia solar, uma altitude média de 4.000m e temperaturas externas que podem chegar a -40 °C no mês mais frio do ano. O objetivo do projeto foi resolver o problema de água para a alimentação e para o banho.

Liu et al. (2013), pesquisadores chineses, analisaram os parâmetros de desempenho térmico da instalação de uma parede Trombe obtidos por meio de testes de abertura e fechamento das saídas de ar. Os parâmetros considerados incluíram a velocidade do ar, a temperatura do ar, a distribuição da temperatura da camada de ar e a temperatura do ambiente interior. A distribuição da temperatura e da velocidade das camadas de ar foi obtida por cálculo numérico. Os resultados mostraram que o momento ideal de abertura do canal de respiro é em torno de 2 a 3 horas após o nascer do sol, e seu fechamento deve acontecer 1 hora antes do pôr do sol. O CFD foi o sistema utilizado para as simulações, e o objetivo foi analisar o armazenamento e a liberação de calor a partir de condições ideais de manuseio das aberturas. Verificaram que a capacidade máxima de armazenamento de calor atinge seu valor máximo às 16h e seu valor mínimo entre 7-8h.

Stephan et al. (2013) analisaram a demanda de energia do ciclo de vida total de uma casa belga com tecnologia passiva. Consideraram a energia incorporada, operacional e de transporte. Os resultados mostraram que as atuais certificações de eficiência energética podem não garantir uma economia de energia, mas, paradoxalmente, ocasionar um aumento de consumo de energia. Limites mais abrangentes do sistema devem ser utilizados para confirmar que a economia de energia primária realmente acontece. Casas passivas podem ter quase o mesmo consumo de energia de uma casa padrão com a mesma geometria, localização e número de ocupantes. Concluíram que, se o objetivo das certificações e normas europeias é reduzir o consumo de energia e das emissões de gases de efeito estufa, essas políticas devem adotar limites do sistema mais amplos que incluam inclusive energia do transporte.

Stevanovic (2013), pesquisador das universidades da Eslovênia e da Sérvia, revisou os estudos de otimização das estratégias de projetos solares passivos em edifícios. Esses projetos propõem maneiras de economia no consumo de energia para aquecimentos, arrefecimentos e iluminação. Ressalta que, apesar da relativa simplicidade em reduzir os gastos de energia por meio da utilização de estratégias individuais, níveis elevados de desempenho energético exigem a combinação ideal de várias estratégias. Indica a necessidade da utilização de programas de simulação juntamente com métodos de otimização como uma maneira de se obter altos níveis de desempenho energético.

Soussi et al. (2013) avaliaram o desempenho térmico de um edifício na Tunísia com mais de 30 anos de construção, cujo projeto inicial é bioclimático. A finalidade foi analisar os efeitos dessas tecnologias passivas e propor soluções para aproveitá-las no inverno e impedir o efeito de superaquecimento no verão. Buscaram-se novas possibilidades de arrefecimento passivo para reduzir o consumo de energia e alcançar bom nível de conforto nos edifícios, principalmente no verão. Concluíram que o isolamento das paredes e da cobertura pode gerar uma economia de energia de cerca de 46% no inverno e de 80% no verão em comparação com um edifício comum. Com o uso das

paredes Trombe é possível diminuir aproximadamente em 21% a necessidade de aquecimento do ambiente interno, mas, apesar da contribuição para o frio, ainda proporciona o superaquecimento no verão. Propuseram um projeto que adicionou estratégias passivas novas às já existentes. A simulação do desempenho térmico do modelo mostrou uma diminuição relevante na demanda de energia.

Abbassi et al. (2014) desenvolveram neste estudo um modelo numérico de um sistema de parede Trombe utilizando o software TRNSYS, que foi validado utilizando-se um protótipo experimental de pequena escala. Esse modelo foi adotado para a investigação numérica de construções típicas da Tunísia. A primeira parte do estudo mostrou que a área de parede Trombe tem um efeito direto sobre a eficiência térmica. Os resultados da simulação mostraram que aproximadamente 77% da demanda total de aquecimento de 16,00 m² de uma edificação simples e sem isolamento podem ser realizados por uma parede Trombe ventilada de 8,00 m². Na segunda parte do trabalho, um estudo paramétrico mostrou que as paredes de alta inércia térmica e com isolamento térmico podem diminuir, consideravelmente, as necessidades de aquecimento.

Briga-Sá et al. (2014) apresentaram um estudo que teve como objetivo definir uma metodologia de cálculo do desempenho energético da parede Trombe baseado na norma ISO 13790:2008 (E), adaptado às condições climáticas portuguesas. Concluiu-se que a maior contribuição para os ganhos de calor global ocorreu pela transferência de calor por condução, convecção e radiação. A existência de um sistema de ventilação na parede maciça teve um papel significativo no desempenho térmico da tecnologia passiva, sua contribuição aumenta conforme a espessura da parede de massa. Foi aplicada a regulação térmica Portuguesa para um edifício residencial com esse sistema e concluiu-se que a energia necessária para o aquecimento pode ser reduzida em 16,36% quando uma parede Trombe é adicionada ao envelope do edifício, melhorando, assim, sua eficiência energética.

Lewandowski e Lewandowska-Iwaniak (2014), da Polônia, propuseram uma nova classificação de materiais a partir da perspectiva de sua utilização em construções com sistemas passivos. O principal critério de classificação utilizado foi o da condutividade de energia térmica e solar, baseado na sua capacidade de conduzir ou bloquear fluxos de energia térmica e solar. A parede Trombe foi inserida na classificação dos materiais de construção que economizam energia. Concluíram que a combinação desses materiais, em soluções híbridas, pode proporcionar novas oportunidades para o segmento da indústria de construção civil preocupadas com a poupança de energia. Indicaram que, para uma diminuição no consumo de energia no inverno, requisitos térmicos dos materiais deveriam promover um abastecimento da energia externa e, ao mesmo tempo, uma retenção da interna. Ainda para o inverno, a energia solar deveria atender a edificação tanto na forma de luz quanto de calor. Há uma dificuldade ou até impossibilidade em utilizar esses requisitos térmicos conjuntamente com as propriedades térmicas dos materiais, pois alguns deles são mutuamente exclusivos.

Bojicet al. (2014) compararam o desempenho energético e ambiental de edifícios com e sem paredes Trombe. Os indicadores do desempenho ambiental utilizados foram a soma de energia operacional primária para o aquecimento durante o inverno e a energia incorporada por ano consumida. Foram utilizadas e estudadas duas paredes Trombe na fachada sul de residências em Lyon, na França. Para simular o comportamento térmico dessas edificações foi utilizado o software EnergyPlus. As residências satisfazem o regulamento térmico francês. Concluíram que o edifício com paredes Trombe poupa aproximadamente 20% de energia final anual para o aquecimento.

Lamnatou et al. (2015), equipe composta por pesquisadores da Espanha, do Reino Unido e da Alemanha, investigaram, teórica e experimentalmente, estudos baseados em sistemas BIST (*Building Integrated Solar Thermal*) – sistemas que projetam utilizando técnicas coletoras de energia solar. O estudo revisou a literatura e agrupou os sistemas em tipos de modelos. O trabalho

concentrou-se nos estudos de modelagem BIST fornecendo detalhes sobre as metodologias de modelagem adotadas e identificando as lacunas em termos de tipos de modelos e tipos de sistemas. Foi desenvolvido e aplicado um modelo de simulação para quatro paredes solares: a parede Trombe, a composta, a com isolamento e a parede Trombe não ventilada. O modelo foi validado com dados experimentais e pode ser usado para estudar os efeitos dos parâmetros de projeto ou novos materiais, além de possibilitar a comparação de diferentes tipos de paredes solares.

Lamnatou et al. (2015), equipe de pesquisadores da Espanha e de Portugal, fizeram uma revisão crítica sobre a Análise do Ciclo de Vida (ACV) em estudos de sistemas solares. A ênfase foi dada nas instalações térmicas solares de BI (*Building-Integrated*), sistemas que estão integrados dentro do prédio. A revisão da literatura mostrou que há uma lacuna no campo de estudos de ACV sobre sistemas solares térmicos de BI, uma nova tendência no setor da construção civil. Encontraram somente uma investigação ACV sobre um sistema de BI ativo solar térmico e poucos estudos sobre paredes solares passivas, como as paredes Trombe.

Lai e Hokoi (2015), representante de Taiwan e do Japão, respectivamente, analisaram os estudos sobre fachadas solares. Baseados na classificação de componentes sólidos e vazios da construção das fachadas, dividiram as fachadas analisadas em fachadas solares opacas e fachadas transparentes ou semitransparentes. Em termos de fachadas solares opacas, colocaram que diferentes sistemas podem ter tratamentos diversos para o calor solar. As fachadas transparentes ou semitransparentes foram classificadas com base no nível de transmitância visível.

2.2.2 O estado da arte no Brasil

Para a produção brasileira de pesquisas relativas ao tema parede Trombe foram encontrados 5 trabalhos.

Figueira et al. (2003) apresentaram um método para avaliar o desempenho diário de uma parede coletora, instalada na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e desenvolveram uma metodologia para medir a sua eficiência diária. Para reduzir o número de variáveis envolvidas, uma secção da parede foi termicamente isolada com uma caixa feita de poliestireno expandido. Utilizaram garrafas plásticas, dispostas simetricamente dentro da caixa, cheias de água para atuar como massa de armazenamento térmico. As temperaturas foram monitoradas através de 26 sensores de temperatura CI (circuito integrado), oito sensores de temperatura PT 100 (termoresistência) e dois sensores de radiação fotovoltaicos. A caracterização do sistema foi obtida por meio da determinação da transmitância dos revestimentos e da eficiência diária. A transmitância do vidro duplo atingiu aproximadamente 55%. Houve um atraso de 4 a 5 horas no fornecimento de calor pela parede térmica para o ambiente interno. A eficiência diária determinada oscilou entre 15% a 25%.

Vettorazi et al. (2010) apresentaram neste estudo uma habitação unifamiliar que utiliza estratégias passivas de conforto térmico e eficiência energética. Esse projeto foi executado para a cidade de Santa Maria – RS, zona bioclimática 2 segundo a NBR 15220. As estratégias adotadas foram a flexibilidade de uso, para se adaptar às constantes variações térmicas, o fácil controle pelo usuário, o baixo custo e a sustentabilidade. A casa utiliza um sistema de ventilação natural por efeito chaminé no inverno e no verão. Para os dias frios, o aquecimento é complementado por um termo acumulador e uma parede Trombe. Os resultados mostram que as técnicas adotadas maximizaram os benefícios térmicos e ambientais.

Cavalcanti (2013), pesquisador de São Carlos, cidade do estado de São Paulo, avaliou o desempenho térmico de um ambiente padrão utilizando paredes Trombe em comparação com um ambiente com as mesmas configurações espaciais dotado de janelas convencionais em oito cidades brasileiras. A análise foi executada por meio de simulações computacionais utilizando o programa EnergyPlus. Após as simulações foi elaborado um modelo matemático simplificado capaz de quantificar a temperatura do ar no interior

dos ambientes na fase de projeto. Concluíram que o sistema Trombe proporciona um conforto térmico melhor quando comparado com janelas.

Suzuki (2012) analisou o potencial de aquecimento e arrefecimento passivos para a utilização da parede Trombe. Construiu dois protótipos em escala reduzida, um deles com parede Trombe e o outro sem o sistema passivo em Curitiba. As medições ocorreram em períodos frios e quentes para configurações distintas do sistema passivo e apresentaram resultados positivos para a utilização da parede Trombe tanto para o inverno quanto para o verão.

Krüger et al. (2013) pesquisaram o potencial do sistema de parede Trombe para a cidade de Curitiba por meio da comparação entre uma edificação com a inserção da tecnologia e outra sem o sistema. Das medições de temperatura de ar das duas células concluíram que há um elevado potencial de aquecimento e arrefecimento no ambiente interno na edificação que usa a tecnologia passiva. Esse potencial vai ao encontro com as estimativas da literatura, que mensura essa redução do consumo de energia em cerca de 30%.

3 MÉTODOS

3.1 Introdução

É pressuposto que um tema de pesquisa que envolva comportamento térmico de uma edificação necessite de experimento. Mesmo com os avanços da ciência da computação e da alta qualidade de programas disponíveis para execução de simulações confiáveis, entender a relação entre clima, implantação, edificação e uso talvez somente seja possível por meio do canteiro de obras, da prática efetiva. A relação que se estabelece entre esses elementos é envolvente e interdependente, indo além dos dados numéricos.

A escolha do tema da pesquisa está relacionada com o desafio de aproveitamento das condições disponibilizadas pelo meio ambiente de interações e convivências passivas no meio urbano. O meio ambiente urbano é afetado por uma série de problemas e agressões contra o ambiente natural instalados durante sua formação e crescimento, sendo a maioria permanente, pelo tipo de política de ocupação urbana. O tema, relativamente desconhecido no Brasil, despertou a pesquisa para o conhecimento do comportamento térmico desse sistema passivo a fim de buscar novas opções de projetos com a utilização de recursos passivos para o conforto térmico.

Já nos primeiros estudos de artigos científicos foi confirmada a necessidade de um estudo experimental. Para se atingir o objetivo da pesquisa, nos moldes do tema proposto, a execução de edificação com monitoramento, em espaço aberto, seria necessária e desejada. Para o arquiteto, construir pressupõe, necessariamente, executar projetos. Para executar projetos, há necessidade de conhecimento e compreensão das dinâmicas do local em que o projeto será executado, além de um programa de necessidades e diretrizes projetuais.

Ficaram estabelecidas e definidas três fases iniciais necessárias para se atingir o objetivo da pesquisa: a execução do projeto, a execução da obra e os períodos de medições. A continuidade se fez pelo monitoramento, pelo tratamento de dados e pelas análises e resoluções finais.

A obra foi executada em curto prazo de tempo para que as medições pudessem ter início no inverno. O cronograma foi cumprido de acordo com o

projeto definido. Ocorreram três intervenções planejadas, pós-obra, para atender às diferentes configurações necessárias à pesquisa. As pequenas ocorrências inesperadas, como o reforço nas portas devido ao empenamento, não atrapalharam ou atrasaram o planejamento inicial.

As medições foram realizadas em três períodos sequenciais. O primeiro período foi chamado de etapa I, o segundo período de etapa II e a etapa III englobou três cenários de configuração distintos. As etapas I e II foram consideradas de adaptação, ajuste e interação entre a pesquisadora, o objeto da pesquisa e a pesquisa.

A etapa III foi composta de três períodos denominados de cenário 1, cenário 2 e cenário 3. Esta denominação foi adotada considerando as diferenças das configurações das aberturas dos protótipos. Para os cenários 1 e 2, os protótipos foram configurados com a finalidade de estudar o potencial da tecnologia passiva para o aquecimento. Para o cenário 3, o objetivo foi o arrefecimento.

3.2 O projeto

Com a disponibilização do local para a implantação, um programa de necessidades foi definido basicamente pelo tema e seus objetivos, como tempo de execução, custos econômicos e diretrizes projetuais. A revisão dos artigos científicos foi a fonte dessas diretrizes. Os critérios utilizados nas diretrizes projetuais foram embasados nas pesquisas. Esses levantamentos, conjuntamente com especificações de materiais empregados comumente na construção civil, foram fatores determinantes na execução do projeto. Durante o processo projetual, visitas ao local de implantação foram executadas para reconhecimento do espaço disponível e o entendimento da influência do entorno, da dinâmica da área e da insolação da região. Esse reconhecimento do local de implantação influenciou e interferiu no processo projetual, provocou uma redução nas dimensões das células, considerou a possibilidade de interferências de sombreamento entre os protótipos decorrente da configuração natural do terreno e os elementos físicos preexistentes na área. O estudo para

implantação e as tecnologias das construções utilizadas foram consequência da prática profissional da pesquisadora.

3.2.1 Local da implantação

O local disponibilizado para a inserção dos protótipos da pesquisa foi na Cidade Universitária da USP, Campus São Paulo. É externo, aberto e denominado Anexo – canteiro de obras. Destina-se a atividades práticas dos estudantes da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo. As coordenadas geográficas do local são (-23.56, -46.73) (Figura 17).

Figura 17 – Vista aérea da localização da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP e do Anexo – canteiro de obras.

Fonte: Google, acessada em 13/09/2015.

As visitas de reconhecimento ao local possibilitaram identificar e considerar os elementos físicos que poderiam interferir e/ou contribuir com a implantação e a insolação dos protótipos. O Anexo é limitado por barreira de tela aramada, abriga trabalhos práticos permanentes executados por alunos da graduação como as edificações e os materiais que dão suporte às aulas. Apresenta caixas

de inspeção de água, telefonia e eletricidade em vários pontos. O terreno natural não é plano e as árvores do entorno, internas e externas à tela aramada, são, na sua maioria, adultas e de grande porte. Do ponto de vista da insolação, mais especificamente do sombreamento, foi necessário considerar a presença de duas árvores, denominadas árvore 1 e árvore 2 (Figuras 18, 19 e 20).

Figura 18 – Vista parcial da área da implantação dos protótipos, dos elementos permanentes e da árvore 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 19 – Vista da árvore 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 20 – Vista parcial da área da implantação com os elementos fixos, o tanque de experimentos, a árvore 1 e os desníveis do terreno.

Fonte: A autora, 2015.

3.2.2 Critérios de implantação

A área de implantação ficou definida inicialmente pela maior área livre disponível para abrigar dois protótipos com um distanciamento mínimo para que não ocorressem sombreamentos mútuos. Considerou-se também que os locais dos protótipos deveriam ser onde houvesse as menores interferências possíveis dos sombreamentos causados pelas árvores 1 e 2. Observou-se no local que a árvore 2 proporciona sombra ao amanhecer e a árvore 1, a partir das 14h30, no mês de junho. As interferências desses sombreamentos, que ocorreram nas etapas I e II, foram diminuindo ao longo do tempo. Para a etapa III, a trajetória do sol havia se alterado o suficiente para não interferir nas medições por sombreamentos.

Para o protótipo referência foi destinado um local próximo à área coberta pela lona tensionada e para o protótipo Trombe, um local próximo à tela aramada. Foi considerada a possibilidade da permanência das células para pesquisas

futuras, o que acarretou uma necessidade de distanciamento das rotas de circulação de pessoas e veículos.

O protótipo Trombe foi fixado perto da tela aramada e o mais distante possível da área de sombreamento da árvore 2. Já o protótipo referência, ou somente referência, foi implantado o mais distante possível da área de sombreamento da árvore 1, mantendo um distanciamento adequado ao manuseio do tanque de experimentos. Essa necessidade de implantação impediu a possibilidade de deixá-los alinhados entre si, como era a pretensão inicial (Figura 21).

Figura 21 – Vista aérea da região e do local da implantação dos protótipos.

Fonte: Google(acesada em 13/09/2015).

3.2.3 O Projeto arquitetônico

Após a definição das diretrizes, o projeto foi executado e finalizado conforme indicam as seguintes representações gráficas (Figuras 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 e 29).

Figura 22 – Representação gráfica da planta do protótipo referência.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 23 – Representação gráfica do corte AA do protótipo referência.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 24 – Representação gráfica da fachada norte do protótipo referência.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 25 – Representação gráfica da planta do protótipo Trombe.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 26 – Representação gráfica do corte AA do protótipo Trombe.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 27 – Representação gráfica da fachada norte do protótipo Trombe.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 28 – Representação gráfica das fachadas sul dos protótipos referência e Trombe.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 29 – Representação gráfica das fachadas leste e oeste dos protótipos referência e Trombe.

Fonte: A autora, 2015.

3.2.4 Diretrizes projetuais

A maioria das diretrizes projetuais adotadas e os materiais especificados têm origem na revisão bibliográfica. Esta premissa não considerou o contexto das pesquisas revisadas, mas, somente os parâmetros adotados que contribuíram com os resultados. As informações complementares, mais do caráter da tecnologia da construção, vieram da experiência profissional da pesquisadora em projetos e execução de obras.

Saadatian et al. (2012) abordaram as características, configurações, tecnologias, vantagens e desvantagens de nove tipos de paredes Trombe. O artigo serviu de base para a maioria das diretrizes adotadas no projeto arquitetônico.

Para proporcionar conforto térmico, a parede Trombe absorve a energia solar e a libera como calor para o interior da edificação. Para o hemisfério sul, a orientação solar que contribui nesse sentido é a face norte, orientação adotada para o projeto da pesquisa.

Hami et al. (2012) salientaram a importância do material a ser utilizado na parede de massa, uma vez que é o componente mais importante dessa tecnologia. O tipo de material pode contribuir significativamente para a eficiência do armazenamento do calor da parede, e para a convecção e condução. Os materiais mais indicados são as pedras, os concretos, os tijolos e o adobe. Optou-se pela utilização de blocos de concreto pela grande aplicabilidade na indústria da construção civil brasileira, por ser um material adequado e indicado pela literatura e pela facilidade em ser adquirido. Foram especificados blocos de concreto estrutural vazados para a execução das paredes. Para a execução geral das unidades, foram utilizados blocos nas dimensões de 0,39 m x 0,19 m x 0,14 m (largura x altura x profundidade), e para a parede de massa, blocos nas dimensões de 0,39 m x 0,19 m x 0,19 m preenchidos por concreto magro.

Além do material, a utilização da cor escura na superfície externa da parede de massa aumenta a taxa de absorção de energia, justificando a pintura com tinta látex preta. Quanto à análise da influência das cores, resultados mostraram que os ganhos de calor através da parede Trombe variaram de 9,7% a 26,9%

para o concreto armado, de 7,1% a 20,5% para o tijolo maciço e de 4,3% a 13,0% para o concreto celular com cores claras e escuras, respectivamente (SÁ, 2011).

Segundo Gan (1998), para se utilizar a parede Trombe para o aquecimento passivo, a saída de ar, da superfície envidraçada, deverá estar fechada e o ar aquecido da caixa de ar deverá ser liberado para o interior da edificação pela abertura de ventilação de ar superior da parede de massa. Este retornará à caixa de ar, pela abertura de ventilação inferior, após aquecer o ambiente interno. Para proporcionar o arrefecimento, a parede de massa deverá estar somente com a abertura de ventilação inferior aberta e na superfície envidraçada da caixa de ar a saída de ar deverá estar aberta. Será necessário também uma abertura no ambiente, oposta ao sistema passivo, com comunicação para o exterior, para promover a troca de ar por meio do efeito chaminé (SHEN et al., 2007). Como o potencial de aquecimento e de arrefecimento é parte integrante da pesquisa e pretende-se que os protótipos fiquem construídos para pesquisas futuras, o projeto previu todas as aberturas possíveis e necessárias.

Um parâmetro contributivo com a eficiência do sistema é a relação da área de parede Trombe e a área total da parede em que a tecnologia passiva é inserida. Segundo Jaber e Ajib (2011), que buscaram o tamanho ideal desse sistema usando como critério o Custo do Ciclo de Vida (LCC), essa relação ótima é de 37% para um tipo específico de habitação residencial, com materiais específicos, com espessuras de 20 cm para a parede Trombe e de 15 cm para a camada de ar. O trabalho foi embasado em simulações, não ocorreram medições. Adotando essa relação e as dimensões do bloco estrutural como unidade projetual, a área da parede da fachada norte do protótipo Trombe ficou com 4,54 m², o sistema passivo, com 1,58 m², e a relação entre essas áreas, em 35%. A espessura ideal de uma parede Trombe está relacionada com a latitude, o clima e a perda de calor. Sá (2011), analisando a capacidade de armazenamento térmico em função da insolação para diferentes materiais, concluiu que a espessura que proporciona o melhor desempenho do sistema passivo está diretamente relacionada ao material utilizado. Esse é o parâmetro que determina o período de transmissão de calor armazenado de fora para

dentro. Pelas variações entre regiões climáticas, deve ser calculada individualmente para cada instalação. No entanto, as paredes Trombe de concreto com parede de massa entre 30 e 40 cm apresentaram um bom desempenho em localizações geográficas diversas. A defasagem de tempo entre o calor absorvido do meio externo e o liberado para o meio interno deve ser entre oito e 12 horas quando se pretende um aquecimento noturno. Para a parede de massa do projeto da pesquisa foram utilizados dois blocos de concreto com 19 cm de espessura mais 1 cm de espessura da argamassa de assentamento, resultando em uma parede de massa de 39 cm no protótipo Trombe. A função de utilização da edificação é determinante na espessura da parede de massa. Em edifícios comerciais, a necessidade de liberação de calor para o aquecimento é mais imediata, justificando espessuras menores para as paredes. Nas residências, essas necessidades ocorrem para o período noturno, portanto, são desejáveis espessuras maiores (SÁ, 2011). Foram especificadas paredes com 14 cm de espessura para as quatro paredes do protótipo referência e do Trombe, exceção feita somente na área do sistema passivo.

São poucos os estudos relativos às aberturas da parede de massa. Balcomb sugere, por meio de Sá (2011), que a área total das aberturas deve variar entre 1% e 2% da área total da parede Trombe. Mendonça, também através de Sá (2011), sugere que as áreas de abertura de ventilação do ar devam estar entre 0,5% e 3% da superfície total da parede. Adotou-se a relação de 3% da área de parede Trombe para as aberturas ($3\% \times 1,58 \text{ m}^2$), resultando, assim, em quatro aberturas de ventilação com $0,06 \text{ m} \times 0,21 \text{ cm}$ (3,1%).

Quanto à disposição das aberturas na parede, Chel et al. (2008) disseram que as aberturas superiores deveriam ter pelo menos a mesma área das aberturas inferiores, que um número maior de aberturas espaçadas entre si é mais eficiente que uma única abertura e, que se houver um desalinhamento entre as aberturas superiores e inferiores, o calor permanecerá mais tempo no compartimento. Para o projeto, especificou-se um desalinhamento de 10 cm entre as aberturas superiores e as inferiores.

É importante e relevante considerar a espessura e o número de camadas de vidro utilizados no sistema. O uso de vidros duplos reduz as perdas de calor no

inverno e aumenta a refrigeração passiva no verão (GAN, 1998), já o vidro simples proporciona maior ganho de radiação solar para a parede térmica durante o dia, pois tem maior transmissividade (KOYUNBABA,2012), sendo que o vidro simples de 3 mm é um tipo de vidro que permite maior transmissão de radiação solar para o interior da edificação, intensificando o efeito estufa (CARAM et al., 1995). O uso de vidro simples, em vez dos duplos, nas fachadas acarreta menor uso de energia para a refrigeração (STAZI et al., 2012). Para a pesquisa, adotou-se o vidro simples, incolor, transparente de 6 mm, por ser o mais especificado e utilizado no nosso mercado.

Não há consenso sobre a espessura da caixa de ar. Para Mendonça, a espessura deve ser entre 5 e 20 cm, e para Moita, deve situar-se entre 10 e 15 cm, segundo SÁ (2011). Para Kalogirou et al. (2002), a espessura de ar e o uso de vidro duplo são insignificantes, mas a utilização de isolamento na cobertura contribui positivamente para o conforto térmico. Ryan e Burek (2010) concluíram que a eficiência térmica está relacionada com a entrada de calor e a altura do sistema, mas não com a profundidade da caixa de ar. Gan (1998) observou que a taxa de fluxo de massa em chaminés solares é maximizada quando a espessura fica entre 0,20 e 0,30 m. Para Liping e Angui, segundo Sá (2011), a espessura ideal da caixa de ar deve corresponder a aproximadamente 1/10 da altura da caixa. Para o projeto, optou-se por 10 cm, medida pertinente às indicações da literatura e adequada ao manuseio de aparelhos de medição no interior da caixa.

Segundo Gan (1998), a introdução de entradas e saídas de ar no vidro da caixa de ar, além das aberturas de ventilação da parede de massa, otimiza o desempenho térmico da parede Trombe tanto para o aquecimento quanto para o arrefecimento. Acrescenta que o aumento da largura do canal eleva o fluxo de ar por meio deste. Para a saída e entrada de ar, da caixa de ar do projeto, foram consideradas medidas apropriadas à manipulação do vidro. Sua área foi estipulada em 6% da área do sistema Trombe, o dobro das aberturas de ventilação da parede de massa. Os vãos finais, tanto da entrada como da saída de ar, ficaram definidos em 0,81 m de largura por 0,125 m de altura. A entrada de ar foi posicionada no nível mais baixo possível da caixa e a saída de ar, no mais alto.

Para que fosse possível o estudo de arrefecimento, foi considerada uma abertura para ventilação na fachada sul, fachada oposta à do sistema Trombe. A área dessa abertura é igual à soma das áreas das aberturas de ventilação inferior e foi inserida na porta, a uma altura de 0,19m do nível do piso, mesma altura adotada abaixo das aberturas de ventilação inferiores da parede de massa.

Segundo Kalogirou (2002), o isolamento da cobertura torna as condições de conforto melhores. O projeto propôs um isolamento térmico utilizando placas de isopor de 5 cm e lona plástica branca nas duas coberturas. A execução do isolamento nas células tem também a função de garantir proteção física, principalmente contra infiltrações de água.

Sobre a estrutura da caixa de ar, não foram encontrados dados na literatura que contribuíssem com o projeto. Optou-se em executar a estrutura em perfis de ferro. A elevada resistência do material possibilita estruturas fisicamente menores, significando que as interferências das sombras serão praticamente inexistentes. Para as laterais da caixa foi indicado fechamento com vidro, maneira encontrada para aproveitar ao máximo a radiação solar.

3.2.5 Considerações sobre o projeto

A unidade dimensional de execução do projeto foi o bloco especificado. Essa determinação, adicionada ao assentamento destes com juntas a prumo, acarretou algumas consequências positivas, pois gerou uma baixa quantidade de entulhos, proporcionou condições de existência de um padrão único de construção entre as células e otimizou o tempo de execução da obra, diminuindo custos por meio dos materiais e do trabalho humano. O formato final dos protótipos em planta foi retangular, com a maior dimensão situada nas fachadas leste e oeste. Essa dimensão foi consequência da necessidade de área para a abertura das portas, situadas nas fachadas sul e, para a disponibilidade de espaço interno para as instalações e manuseios dos instrumentos de medição. A diferenciação entre as duas células projetadas foi exatamente de 1,58 m², ou seja, a área do sistema Trombe. Com exceção da

área do sistema Trombe, as paredes foram projetadas com 14 cm de espessura mais 1 cm de argamassa de assentamento horizontal e vertical, conforme recomenda a NBR 15961:2011. Para as paredes, especificou-se o acabamento de material aparente, uma das maneiras de padronização das duas células. Para a parede de massa ou térmica, foram especificados blocos com 19 cm de espessura utilizados em duplicidade para aumentar a espessura da parede térmica e preenchidos com concreto magro para compor a parede térmica. Considerando a espessura da argamassa de assentamento horizontal e vertical com 1 cm, as dimensões finais em planta da parede de massa resultaram em 79 cm de largura por 39 cm de profundidade ou espessura.

As dimensões das bases dos protótipos foram calculadas com 20 cm além da projeção do perímetro externo das paredes, atendendo, assim, a uma área de isolamento suficiente para a proteção das paredes de infiltrações ascendentes do solo. Para a estrutura da base, tipo radier, foi especificada malha de ferro estrutural utilizada sobre lona plástica assentada sobre camada de brita.

Apesar da especificação de blocos estruturais na execução das paredes, que por si só seriam suficientes para a estabilidade estrutural das células, ficou determinado no projeto o chumbamento de barras de ferro na base, localizadas nas quinas entre as paredes. Essa ferragem, após amarração com a ferragem empregada na cinta de amarração superior, proporcionaria maior estabilidade estrutural das células. A preocupação em relação à estabilidade tem origem na possibilidade de fissuras e aberturas na edificação, podendo ocasionar infiltrações de água.

Para o acesso ao interior foi especificado o uso de portas de madeira com abertura convencional de 70 cm de vão luz. O vão disponível para a instalação da porta foi decorrente do assentamento dos blocos. Os eixos centrais das portas foram alinhados aos eixos centrais da parede fachada norte do protótipo Trombe e ao da fachada norte no protótipo referência.

Para as lajes de cobertura foram especificadas lajes pré-moldadas em concreto com blocos cerâmicos furados. A não ser pelo isolamento térmico da cobertura, não foram encontradas outras considerações na literatura.

Para a caixa de ar do sistema passivo Trombe havia a possibilidade de empregar o alumínio ou o ferro. A escolha do material deveria considerar a semelhança da caixa de ar com um caixilho, a sua classificação como uma saliência da fachada e o seu emprego em uma fachada norte. Na literatura foi observada a utilização de madeira nas estruturas da caixa de ar das paredes Trombe, mas, além do custo alto, sua manutenção é muito elevada quando exposta a intempéries. A opção pelo ferro foi pela resistência do material e pela possibilidade de execução em um prazo mais curto. A indústria de alumínio é mais exigente quanto a prazos. O tempo de execução dessa estrutura influenciaria a aquisição dos vidros. Por terem medidas específicas, somente poderiam ser levantadas após a entrega da estrutura. As dimensões da parede de massa definiram a largura e a altura da estrutura de ferro da caixa de ar. As dimensões das aberturas e da espessura foram consequência da literatura.

Dimensionada a estrutura da caixa de ar, foi possível prever a quantidade de fitas de borracha de vedação que deveriam ser empregadas na instalação da estrutura da caixa de ar e na colocação dos vidros.

A quantidade de materiais necessários foi calculada antes do início da obra. Uma condição preestabelecida foi que os materiais a serem empregados, dentro do possível, deveriam ser comerciais, com fácil aquisição tanto pela disponibilidade no mercado como pelos custos. Essa condição somente não foi cumprida em relação à estrutura da caixa de ar.

3.3 Execução da obra

Para a demarcação da obra foi localizado o norte verdadeiro por meio do percurso do sol pela sombra de uma haste (Figura 30). A base dos protótipos foi classificada por meio de quatro pontos do eixo cartesiano, com coordenadas e abscissas. As cotas utilizadas foram fornecidas pelo projeto. O uso da linha esticada entre dois pontaletes estabeleceu o eixo Leste-Oeste, este foi o alinhamento fixo. Com o uso do esquadro foi traçado o triângulo clássico 3x4x5 e com dois outros pontaletes e outra linha demarcou-se o eixo norte-sul na perpendicular. No encontro das duas linhas foi batido o primeiro pontalete da

marcação da obra e demarcado o primeiro ponto cartesiano da base. O processo de triangulação foi executado nos outros três cantos. Após os quatro estaqueamentos dos cantos verificou-se a igualdade de medidas entre as diagonais, confirmando, assim, o esquadro do retângulo demarcado. O procedimento foi repetido para a demarcação do outro protótipo (Figura 31).

Figuras 30 e 31 – Trajetória do sol através da marcação da sombra da haste e marcação do protótipo Trombe.

Fonte: A autora, 25/05/2015.

O início da obra ocorreu após a disposição de todo o material no Anexo. Para a execução da obra foram empregadas diretamente três pessoas. Os protótipos foram levantados e cobertos em sete dias úteis com uma média de 10 horas de trabalho por dia. O acompanhamento da execução foi diário. Após esse período, algumas interferências ocorreram para ajustes e alterações necessários no desenvolvimento da pesquisa ou para sanar qualquer problema de outra natureza.

Inicialmente, o terreno foi limpo e apiloado para receber a base, tipo radier, nas áreas marcadas pelos pontaletes. Com o terreno limpo e apiloado, foram executadas tabeiras com sarrafos de 10 cm com dupla função, de gabarito e forma para a concretagem da base. Essa área recebeu uma camada de brita nº 1 que foi recoberta com lona plástica. A armação metálica foi fixada com

caranguejos metálicos, acessórios que ajudam na fixação e mantêm um distanciamento necessário do solo. O concreto foi lançado, espalhado, adensado e nivelado. Com as bases prontas, foram chumbadas as ferragens estruturais verticais, localizadas nos quatro cantos dos protótipos. Essas ferragens foram posteriormente amarradas às ferragens empregadas nas cintas de amarração superiores, proporcionando estabilidade estrutural às edificações (Figura 32).

Figura 32 – Base tipo radier com as formas, a lona plástica e a ferragem chumbada.

Fonte: A autora, 2015.

Para as paredes, foram empregados os blocos de concreto estrutural vazados de 0,39 m x 0,19 m x 0,14 m (largura x altura x espessura). Para as aberturas de ventilação das paredes norte, foram empregados blocos de 0,09 m x 0,19 m x 0,14 m e de 0,19 m x 0,19 m x 0,14 m (largura x altura x espessura). A combinação das diferentes larguras de blocos permitiu a execução das aberturas de ventilação (Figura 33).

Figura 33 – Levantamento das paredes com blocos de concreto, amarração estrutural da base com as paredes e simulação das duas fiadas que terão as aberturas de ventilação.

Fonte: A autora, 2015.

A última fiada de blocos das paredes foi executada com blocos canaleta, que, utilizados juntamente com a ferragem, executaram o fechamento estrutural superior, a cinta de amarração. Após o levantamento das paredes, foram executadas as coberturas com lajes pré-fabricadas de concreto e blocos cerâmicos e, a seguir, executadas as concretagens após os escoramentos (Figura 34). O traço do concreto utilizado foi de quatro latas de areia para cinco latas de pedra nº1 para um saco de 50 kg de cimento. Esse traço foi empregado para a base e para a cobertura. A lata utilizada foi de 18 litros. Após 11 dias de secagem do concreto, foram retiradas as escoras e instaladas as portas. O protótipo Trombe recebeu pintura com tinta preta sobre a

superfície externa da parede de massa e a caixa de ar foi instalada (Figuras A e B).

Figura 34 – Laje pré-moldada da cobertura instalada e pronta para a etapa de concretagem no protótipo referência.

Fonte: A autora, 2015.

Foi executada uma vedação interna com silicone na estrutura metálica da caixa de ar antes da sua instalação. A estrutura metálica foi chumbada sobre a área da parede de massa utilizando buchas e parafusos. Entre a estrutura e a parede foram empregadas fitas de borracha preta para assegurar a vedação. A mesma fita foi utilizada na colocação dos vidros, que foram fixados com baguetes metálicas e parafusos (Figuras 35, 36, 37, 38, 39 e 40).

Figuras 35, 36, 37, 38– Vedação com silicone, vedação da estrutura de ferro com fita de borracha, vedação do vidro com fita de borracha e instalação das baguetes de fixação dos vidros, respectivamente.

Fonte: José Luiz Pedroso Cesso, 2015.

Figuras 39 e 40– Pintura na superfície externa da parede de massa e instalação da caixa de ar do protótipo Trombe, respectivamente.

Fonte: José Luiz Pedroso Cesso, 2015.

Para o acesso ao interior foram instaladas as portas de madeira. A instalação foi executada com o uso de espuma expandida, e tanto a folha quanto o batente tiveram suas alturas reduzidas em função da altura disponibilizada pelo assentamento dos blocos.

Dia 23 de junho, após a instalação dos equipamentos de medição, iniciou-se a etapa I de medições. Após alguns dias, com períodos alternados de chuva, verificou-se uma condensação de água, em quantidade não esperada, na superfície interna do vidro do sistema Trombe. A inspeção e verificação das condições externas dos módulos não apresentou nenhuma irregularidade aparente. Na verificação interna, após abertura das unidades, observou-se que havia manchas úmidas em algumas áreas das paredes, possivelmente em decorrência de infiltrações nas coberturas. A maior área de umidade foi encontrada no protótipo Trombe. Confirmado que os instrumentos não sofreram qualquer dano ou comprometimento, as portas foram trancadas novamente e as medições continuaram. Os acessos internos aos protótipos foram efetuados no período da manhã. Fechamentos no período da tarde, com temperaturas mais altas e umidade relativa baixa, poderiam provocar condensações de água na superfície interna do vidro, situação vivenciada no início da pesquisa da etapa I após o primeiro fechamento dos protótipos ter ocorrido no final da tarde.

O isolamento das coberturas foi um trabalho externo de 12 horas com duração de um dia. Ocorreu seis dias após o fechamento dos protótipos e o início das medições. A cobertura foi isolada com placas de isopor e lona plástica branca. Foram estendidas e presas nas laterais superiores das quatro fachadas das células com abraçadeiras de nylon e parafusos pitão de argola, conforme ilustram as figuras 41, 42 e 43.

Tomou-se o cuidado de manter uma inclinação mínima do centro do isolamento para as laterais para que não ocorresse, em nenhuma hipótese, acúmulo de água nas coberturas. Por ser externa, a intervenção somente manipulou os sensores de temperaturas superficiais externas da cobertura, os demais permaneceram medindo. Esses dois sensores foram deslocados temporariamente, ficando presos nas paredes da fachada leste durante a execução do isolamento. O primeiro protótipo a receber a cobertura foi o

Trombe. Ao término dos isolamentos, os sensores externos retornaram sobre as coberturas.

Figuras 41 e 42– Placas de isopor sobre as lajes e detalhe da proteção da cobertura Trombe após finalização, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 43– Vista dos protótipos com as coberturas finalizadas.

Fonte: A autora, 2015.

Dia 25 de agosto foi executada a segunda intervenção necessária, para possibilitar a execução da etapa III de medições. Para essa etapa foram programadas três séries de imagens termovisoras. Houve necessidade de alterações que possibilitassem a execução das imagens no menor tempo possível sem que as portas fossem abertas. Foram executados furos com a serra-copo para acoplar a câmera FLIR e confeccionadas e instaladas tampas articuladas para essas aberturas. Na ocasião, foram executadas também as aberturas na parte inferior das portas para o cenário 3, situação de pesquisa para o arrefecimento. Além das aberturas, foi instalada uma tela de galinheiro e confeccionados tampos removíveis para as aberturas das portas. Constatou-se nesse dia a necessidade de reforço na parte inferior interna das portas com placa de madeira, pois estavam danificadas e empenadas pela água da chuva (Figuras 44 e 45).

Figuras 44 e 45– Recuperação da parte danificada da porta com as intervenções necessárias e instalação de tela para proteção contra entrada de animais, respectivamente.

Fonte: José Luiz Pedroso Cesso, 2015.

No dia 19 de outubro ocorreu a terceira e última intervenção necessária. Para proporcionar a ventilação cruzada do cenário 3 foram instaladas telas de galinheiro nas aberturas externas, que deveriam ficar abertas, e proteção contra a água das chuvas nas aberturas de ventilação superiores da fachada norte do protótipo referência e nas aberturas para ventilação das duas portas.

Foi também instalada uma tela de galinheiro na saída de ar do vidro do protótipo Trombe (Figuras 46, 47, 48 e 49).

Figuras 46 e 47– Tela no vão da saída de ar após a retirada da proteção do vidro e cobertura externa sobre vão de ventilação inferior na porta, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015.

Figuras 48 e 49– Fachadas norte preparadas para o cenário 3. Trombe e referência, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015.

As imagens executadas nessa etapa estão disponíveis no Apêndice A.

3.4 Medições

As grandezas pesquisadas para a realização deste trabalho foram as temperaturas superficiais internas e externas, a temperatura do ar, a velocidade do ar e a umidade relativa, variáveis ambientais que influenciam no conforto térmico. Foram executadas imagens termográficas com o objetivo de obter sequências das diferenças de temperaturas nas superfícies internas das fachadas norte nos dois protótipos. Os dados de radiação global utilizados foram fornecidos pelo I.E.E.

Com exceção da radiação global que foram fornecidas pelo IEE, as demais medições foram executadas com instrumentos do Laboratório de Tecnologia da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo.

3.4.1 Instrumentos e localizações

Para as medições executadas nos protótipos foram utilizados:

- 11 Data - logger (coletores de dados), modelo HOBO U12-013, marca Onset Computer Corporation, 5 no protótipo referência e 6 no protótipo Trombe (Figura 54);
- 1 HOBOWare Pro Growing Degree Days Assistant User's Guide, da Onset Computer Corporation;
- 6 sensores de vento, modelo T-DCI-F900-S-P, marca Onset Computer Corporation, 3 em cada protótipo (Figura 55);
- 18 sensores de temperatura, modelos HOBO TMC6-HD, HOBO TMC20-HD e HOBO TMC50-HD, marca Onset Computer Corporation, 8 utilizados no protótipo referência e 10 no protótipo Trombe (Figura 56).

As especificações técnicas dos instrumentos estão disponíveis no Anexo A.

Para as medições de temperatura, os data - loggers necessitam de baterias. Os sensores de ventilação necessitam de energia elétrica, fornecida pelo ponto existente na bancada de trabalho da área de cobertura tensionada.

A fixação dos termopares nas superfícies porosas foi feita com o uso de massa plástica nos cabos. Nas lonas plásticas foram utilizadas fitas silver tape. Nos sensores foi utilizada pasta térmica para facilitar a condução do calor.

Figuras 54, 55 e 56 – Datalogger HOBO U12-013, sensores de vento HOBO T-DCI-F900-S-P e sensores de temperatura: HOBO TMC6-HD, respectivamente.

Fonte: <http://www.onsetcomp.com> (acessado em 27/01/2016).

Os instrumentos empregados nas medições das células foram preparados e instalados por um Técnico de Laboratório, do Laboratório de Tecnologia da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP. Esse material é propriedade da faculdade e a instalação ocorreu num período de aproximadamente 3 horas. Após a finalização e conferência das condições de funcionamento dos instrumentos, foram fechadas as portas das unidades e a etapa I de medições foi iniciada mesmo sem o isolamento das coberturas. Ressaltando que essa etapa de medições foi considerada de ajustes e acertos para o desenvolvimento da pesquisa.

Os locais definidos para a instalação dos instrumentos foram as coberturas, as paredes das fachadas norte e o vidro do protótipo Trombe para medições de temperaturas superficiais internas e externas. As temperaturas e velocidades do ar foram registradas nas aberturas de ar superior e inferior das paredes da fachada norte e nos globos. Foram registradas também, nos globos, a temperatura de globo e a umidade relativa do ar.

Foram 12 pontos de medição no referência e 14 pontos no Trombe. Dos 14 pontos do Trombe, 12 eram comuns com o protótipo referência. Os 12 pontos comuns medidos foram: temperatura superficial interna e externa da cobertura (2), temperatura superficial interna e externa da parede fachada norte (2), temperatura e velocidade do ar na abertura superior (2), temperatura e velocidade do ar na abertura inferior (2), e temperatura do ar, velocidade do ar, umidade relativa do ar e temperatura de globo, no globo (4). Os 2 pontos restantes foram das medições de temperaturas superficiais internas e externas do vidro (2) no protótipo Trombe. Nas figuras 50 e 51 é possível verificar os seis pontos internos de medição em cada uma das células. Nas figuras 52 e 53 visualiza-se o termopar da superfície externa da fachada norte do referência e os termopares da parede de massa e da superfície interna de vidro, respectivamente.

Figuras 50 e 51 – Superfícies internas das fachadas norte com instrumentos de medição no protótipo referência e no Trombe, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015.

Figuras 52 e 53 – Superfícies externas das fachadas norte com instrumentos de medição no protótipo referência e Trombe, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015.

Os protótipos ficaram um mês fechados, sendo inspecionados externamente com regularidade, sem indicações de qualquer mudança que sugerisse a necessidade de alguma intervenção física. Ao baixar os dados, verificou-se que por um período extenso não ocorreram as medições da superfície externa da parede da fachada norte do protótipo referência. Esse período foi do dia em que ocorreram os trabalhos de isolamento até alguns poucos dias antes da data de recolhimento de dados. Possivelmente o trabalho executado na cobertura interferiu de maneira sutil na instalação do sensor a ponto de não possibilitar uma percepção visual dessa falha, apesar das visitas de inspeção regulares. A hipótese talvez seja confirmada pela apresentação de medições desse sensor nos dias finais dessa etapa. Acredita-se que o sensor foi verificado manualmente e essa manobra estabeleceu o contato necessário com a superfície, justificando, assim, o reinício das medições.

As regularidades das visitas para inspeções aconteceram de acordo com as possibilidades de acesso ao Anexo, pois fica inacessível aos sábados, domingos e feriados. Períodos de chuva intensificaram as inspeções para a verificação de possíveis infiltrações. Nesses períodos ocorreram várias visitas no mesmo dia, já em períodos de seca, uma vez a cada dois dias. A regularidade aqui referida diz respeito à pesquisadora e ao técnico de laboratório, uma vez que o Anexo tem um responsável que permanece nove horas por dia no local, além da equipe de segurança que faz rondas 24 horas por dia nos sete dias da semana. Foi registrado um final de semana sem energia elétrica para alimentar os sensores de vento, o cabo de alimentação foi desconectado do ponto de fornecimento.

3.4.2 Testes

Foram executadas três etapas de medições, sendo a última composta por três cenários distintos. A etapa I ocorreu de 23/06/2015 a 29/07/2015, a etapa II de 31/07/2015 a 27/08/2015. A etapa III foi composta por três cenários. O cenário 1 foi configurado para pesquisar sobre o desempenho do sistema passivo para o aquecimento noturno, seu período de medições foi de 31/08/2015 a 28/09/2015. O cenário 2, de 28/09/2015 a 19/10/2015, com uma configuração de aberturas diferentes do cenário 1, também foi executado para avaliar o desempenho para o aquecimento noturno. O cenário 3, realizado de 19/10/2015 a 25/11/2015, foi preparado para pesquisar sobre o desempenho da parede Trombe ventilada para o arrefecimento diurno. As tabelas abaixo demarcam, para cada protótipo, as configurações das aberturas adotadas em cada etapa de medição. A tabela superior diz respeito às etapas I e II (Figura 57), e a seguinte, à etapa III (Figura 58). Recordando que as análises finais e conclusivas da pesquisa foram embasadas nos resultados da etapa III.

Figura 57 – Tabela de indicação da condição de cada abertura para as etapas I e II de cada protótipo.

COMPONENTE	ABERTURA	ETAPA I		ETAPA II	
		REFERÊNCIA	TROMBE	REFERÊNCIA	TROMBE
VIDRO	SAÍDA DE AR	NÃO TEM	FECHADA	NÃO TEM	FECHADA
	ENTRADA DE AR		FECHADA		FECHADA
PAREDE FACHADA NORTE	ABERTURA DE VENTILAÇÃO SUPERIOR	FECHADA	ABERTA	FECHADA	ABERTA
	ABERTURA DE VENTILAÇÃO INFERIOR	FECHADA	ABERTA	FECHADA	ABERTA
PORTA	VENTILAÇÃO FACHADA SUL	FECHADA	FECHADA	FECHADA	FECHADA

Fonte: A autora, 2015.

Figura 58 – Tabela de indicação da condição de cada abertura para os cenários 1, 2 e 3 da etapa III de medições em cada protótipo.

COMPONENTE	ABERTURA	ETAPA III					
		cen1 - aquecimento		cen2 - aquecimento		cen3 - arrefecimento	
		REFERÊNCIA	TROMBE	REFERÊNCIA	TROMBE	REFERÊNCIA	TROMBE
VIDRO	SAÍDA DE AR	NÃO TEM	FECHADA	NÃO TEM	FECHADA	NÃO TEM	ABERTA
	ENTRADA DE AR		FECHADA		FECHADA		FECHADA
PAREDE FACHADA NORTE	ABERTURA DE VENTILAÇÃO SUPERIOR	FECHADA	ABERTA	FECHADA	FECHADA	ABERTA	FECHADA
	ABERTURA DE VENTILAÇÃO INFERIOR	FECHADA	ABERTA	FECHADA	FECHADA	FECHADA	ABERTA
PORTA	VENTILAÇÃO FACHADA SUL	FECHADA	FECHADA	FECHADA	FECHADA	ABERTA	ABERTA

Fonte: A autora, 2015.

Não houve um período pré-estipulado para quaisquer das etapas de medições. Foram as condições climáticas do período de medição e o cenário estudado que determinaram o término das medições. O período de medições para o cenário 1 foi de 28 dias, para o cenário 2 foram 21 dias e para o cenário 3 foram 37 dias. O período do último cenário foi o mais longo, pois, apesar de ter sido realizado no meio da primavera, as temperaturas foram relativamente baixas. O dia mais quente da etapa III de medições foi registrado no cenário 2.

As medições foram registradas de 15 em 15 minutos, ininterruptamente. Ao término de cada etapa de medições, os dados eram baixados no programa correspondente e, depois, tratados no Microsoft Office Excel, editor de planilhas produzido pela Microsoft, para em seguida serem inseridos em gráficos de linhas.

As planilhas geradas dessas medições estão disponíveis em: <<http://www.fau.usp.br/pesquisa/laboratorios/labaut/>>.

Nos dias de coleta de dados também eram verificadas as baterias dos data - loggers. É importante ressaltar que, apesar de a etapa III de medições ser a utilizada para as análises conclusivas, as etapas I e II contribuíram com as conclusões finais, pois apresentaram resultados semelhantes ao do cenário 1, mesmo com as diferenças climáticas dos períodos. As configurações dos protótipos dessas duas etapas eram exatamente iguais às do cenário 1. Outro ponto relevante importante diz respeito ao início das medições da etapa I. Os dias que antecederam o isolamento térmico não foram considerados na execução dos gráficos da etapa I, porém foram executados gráficos desses seis dias e estes apresentaram alterações significativas e relevantes das condições térmicas decorrentes do isolamento das coberturas.

As medições registradas foram baixadas dos data - loggers e trabalhadas como planilhas no Excel. A partir dessas planilhas foram executados gráficos de linhas organizados por grandeza registrada, local de instalação do instrumento de medição e nomenclatura do protótipo correspondente aos registros. Esse procedimento foi efetuado nas três etapas de medições e gerou 202 gráficos, disponibilizados no Apêndice B. Os gráficos foram nomeados e identificados conforme a grandeza física a que se referem, o local em que ocorreu a medição, o(s) protótipo(s) em questão, a etapa de medição, o cenário e a

unidade da grandeza. Por exemplo: “Diferenças das Temperaturas Superficiais Externas das Paredes Norte Trombe e Referência III cen1 (°C)” diz respeito ao gráfico das diferenças entre as temperaturas externas das paredes norte entre o protótipo Trombe e o protótipo referência na etapa III de medição, no cenário 1 (aquecimento), utilizando a unidade de graus Celsius. O eixo das coordenadas dos gráficos é o do período de tempo em que ocorreu a medição (medições de 15 em 15 minutos).

3.4.3 Dados fornecidos pelo IEE

O Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF) do IEE (Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo) forneceu as planilhas com registros de hora em hora da irradiação global (horizontal), da irradiação difusa, da irradiação global (inclinada), estas três com a unidade de KWh/m²/dia, da temperatura do ar medida em °C, da umidade relativa medida em % e da velocidade do vento medida em m/s.. As planilhas abrangeram os três períodos de medição – etapas I, II e III.

Os instrumentos de medição utilizados para o levantamento desses registros estão instalados em estação localizada no Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, Av. Prof. Luciano Gualberto, 1.289, Cidade Universitária. Estão instalados 3 m acima do chão (Figura 59). Na figura 60 é possível verificar a distância entre a FAU e o LSF.

Os instrumentos utilizados pelo LSF foram:

- Data - logger (coletor de dados), marca CAMPBELL SCIENTIFIC, modelo CR 10X;
- Anemômetro (velocidade do ar), marca YOUNG, modelo 05103;
- Termo - higrômetro (temperatura e umidade do ar), marca VAISALA, modelo HMP 45C;
- Piranômetro (radiação solar), marca KIPP & ZONEN, modelo CMP 6.

As especificações técnicas desses instrumentos estão disponíveis no Anexo A.

Figura 59 – Estação do IEE, localizada no Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos, com sensores instalados a 3 m do chão.

Autor: Ranieri Carvalho Higa, 2015.

Figura 60 – Distância da FAU ao IEE.

Fonte: www.google.com.br/maps (2016).

3.4.4 Medições com câmera termográfica

A termografia permite visualizar as diferenças de temperaturas. A radiação é convertida em uma imagem visual por uma câmera termográfica. As diferentes temperaturas são indicadas com cores ou diferentes tons de cinza (CORTIZO, 2007). A câmera utilizada na pesquisa foi a FLIR i40, instrumento da FLIR Systems Inc. (especificações no Anexo A).

As imagens internas das paredes das fachadas norte foram executadas de uma em uma hora, em horas cheias, através das aberturas dos tampos articuláveis localizados nas portas dos protótipos. Os tampos articuláveis permaneceram abertos somente o tempo necessário para a execução das fotos (Figuras 61 e 62). Para o cenário 1 foram feitas 26 imagens noturnas das 18h do dia 24/09/2015 até as 6h do dia 25/09/2015. Para o cenário 2 foram feitas 26 imagens noturnas das 18h do dia 8/10/2015 até as 6h do dia 9/10/2015. Esses cenários necessitavam de imagens noturnas, pois foram preparados para pesquisar as condições térmicas para o aquecimento noturno. Para o cenário 3, cenário de arrefecimento, foram efetuadas 28 imagens diurnas das 6h às 19h do dia 23/11/2015. As imagens do cenário 3 foram executadas com o horário de verão em vigor.

Figuras 61 e 62 – Detalhe da abertura e do tampo articulável para utilização da câmera termográfica.

Fonte: A autora, 2015.

Para contribuir com as análises, foram executadas imagens internas das superfícies das paredes norte dos dois protótipos com câmera termográfica nos três cenários, através das aberturas dos tampos articuláveis localizados nas portas dos protótipos. Algumas imagens externas foram registradas e contribuíram para as conclusões. Foram três procedimentos, nomeados de sessões, que geraram 90 imagens. Essas imagens foram identificadas e tratadas e encontram-se à disposição no Apêndice C. Para a identificação das imagens termovisoras estabeleceu-se o seguinte critério de informações: se é externa ou interna, o local que deu origem às imagens, qual o protótipo, o horário e a data da execução da imagem. Foram identificadas as temperaturas superficiais mais baixas e mais altas, internas e externas, de cada sessão, e esses dois valores foram registrados na escala das imagens. Como exemplo, segue uma das imagens disponíveis no Apêndice (Figura 63).

Figura 63 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência às 18h de 24/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Foram executadas 12 imagens externas dos protótipos: quatro no cenário 1, seis no cenário 2 e duas no cenário 3.

As imagens produzidas estão disponíveis no Apêndice C.

3.5 Monitoramento e tratamento de dados

O monitoramento térmico dos protótipos teve acompanhamento do técnico de laboratório durante toda a pesquisa. A instalação dos instrumentos, a verificação de funcionamento, a manutenção das baterias, o recolhimento de dados armazenados, o lançamento no programa específico e o tratamento inicial dos dados no Excel foram responsabilidades desse profissional. Após esses tratamentos, o material foi disponibilizado para os estudos.

3.6 Análise e interpretação dos dados

Para possibilitar os estudos e análises, foram configuradas planilhas e gráficos específicos a partir das planilhas iniciais fornecidas pelo técnico. Essas novas planilhas deram origem a gráficos de linhas que foram classificados por grandeza monitorada, local de medição, classificação do protótipo, etapa da medição e unidade da grandeza. Foram executados gráficos para cada unidade e gráficos comparativos entre os protótipos.

A análise dos gráficos possibilitou o estudo do comportamento térmico dos protótipos tanto individualmente como por comparações. Foram executados gráficos comparativos por meio das diferenças entre as medições do protótipo Trombe e o protótipo referência. Esses gráficos permitiram análises por meio das amplitudes e atrasos térmicos. O atraso térmico permitiu estimar o tempo de defasagem entre as temperaturas superficiais externas e internas. Além da execução dos gráficos, as planilhas forneceram dados específicos importantes para o entendimento dos comportamentos térmicos, ao longo da pesquisa, como a máxima e a mínima de cada grandeza medida, a média por período determinado e os horários de ocorrências específicas. Os resultados finais e as conclusões da pesquisa foram embasados nesse banco de dados.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Introdução

Este capítulo apresenta os principais resultados obtidos do levantamento experimental realizado nesta pesquisa, a análise comparativa e a discussão dos resultados. A análise principal foi feita por meio dos gráficos para cada cenário e possibilitou a compreensão do comportamento térmico das unidades experimentais. Para complementação da análise principal foram utilizados os registros termográficos.

4.2 Comportamento térmico das coberturas e da parede Trombe: antes e após o isolamento das coberturas

Após a execução dos protótipos foram iniciadas as medições. Foram instalados nas coberturas sensores termopares, internos e externos, para medir as temperaturas superficiais. A diferença entre os gráficos das temperaturas superficiais internas e externas dos protótipos foi praticamente inexistente no período da etapa I. Recordando que nesta etapa o protótipo referência apresentava todas as aberturas fechadas e o protótipo Trombe apresentava as aberturas de ventilação da parede térmica abertas e as demais fechadas. O comportamento das curvas representativas das alterações de temperaturas alterou significativamente após o isolamento das coberturas, em 29/06/2015, como mostram as figuras 64 e 65 a seguir. É possível, inclusive, identificar na figura 65 a diminuição da temperatura externa do protótipo Trombe, o sensor esteve deslocado durante os trabalhos de isolamento. O protótipo Trombe foi o primeiro a receber o isolamento. Para o protótipo referência não houve tempo significativo para essa alteração, pois o isolamento dessa célula foi executado em menos tempo e em uma cronologia de etapas diferente da empregada no Trombe.

Figura 64 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da cobertura do protótipo referência na etapa I.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 65 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da cobertura do protótipo Trombe na etapa I.

Fonte: A autora, 2015.

A mudança significativa do comportamento térmico, após o isolamento, instigou uma análise desse período específico isoladamente. Foram selecionadas, das planilhas gerais, as medições de 23 de junho a 2 de julho de 2015 das temperaturas superficiais internas e externas das coberturas e das paredes fachada norte. A intenção foi analisar se havia consequências no comportamento das paredes das fachadas norte após o isolamento da cobertura. Apesar de as medições da fachada norte do protótipo referência terem sido interrompidas no dia 29, é possível constatar visualmente as diferenças de comportamento térmico entre as paredes até esse dia e comprovar a mudança do comportamento térmico na parede Trombe após o isolamento da cobertura, conforme apresenta o gráfico da figura 66.

Figura 66 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas das paredes fachada norte dos protótipos referência e Trombe na etapa I (23/06/2015 a 02/07/2015).

Fonte: A autora, 2015.

A partir do isolamento da cobertura do protótipo Trombe as temperaturas superficiais externas apresentaram um aumento em suas temperaturas

máximas e mínimas, e as temperaturas internas mantiveram-se abaixo da mínima externa, como mostra o gráfico da figura 67.

Figura 67 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da parede fachada norte do protótipo Trombe na etapa I após a execução do isolamento da cobertura.

Fonte: A autora, 2015.

As superfícies das coberturas, anteriormente ao isolamento, eram de concreto, cor cinza claro. Essa textura e essa cor possibilitam uma absorção maior de energia radiante, que, por inércia térmica, é transferida para o interior, como calor. Após o isolamento com placas de isopor e lona plástica, a reflexão da radiação aumentou, pois a lona plástica é branca e semibrilhante, justificando, portanto, o aumento das amplitudes das temperaturas superficiais externas das coberturas e uma diminuição das temperaturas superficiais internas.

A análise da alteração do comportamento térmico da fachada norte do protótipo Trombe após o isolamento da cobertura comprova as afirmações de Kalagirou et al. (2002) de que o isolamento da cobertura é uma necessidade para melhores condições de conforto.

4.3 Resultados e análises

Os resultados parciais serão expostos de acordo com as medições executadas, ou seja, identificados por meio da localização dos instrumentos de medições, das grandezas medidas, da classificação do protótipo e do número do cenário. Optou-se pelo uso de tabelas para a apresentação de alguns dados significativos para a conclusão, pois esse recurso mostrou-se eficiente.

Para as análises de velocidades do ar, os valores apresentados serão semelhantes, pois, como a acurácia do sensor é de 0,05 m/s, os valores finais, de medidas relativamente baixas e próximas, sofreram arredondamento de uma casa após a vírgula.

A seguir serão apresentados os resultados e análises para os cenários 1, 2 e 3.

4.3.1 Resultados do cenário 1 para aquecimento passivo noturno

O cenário 1 foi monitorado de 31 de agosto a 28 de setembro de 2015. A temperatura média externa do período foi de 21 °C, a mínima externa foi de 13,6 °C às 23h do dia 12 de setembro e a máxima externa foi de 35,9 °C às 16h do dia 24 de setembro.

4.3.1.1 Aberturas superiores e inferiores

4.3.1.1.1 Temperatura do ar

O gráfico das diferenças entre as temperaturas do ar nas aberturas inferior e superior do protótipo referência indicou uma temperatura mais elevada a favor da abertura superior (Figura 68). Para o protótipo Trombe, as diferenças entre temperaturas inferior e superior registraram valores mais elevados para a temperatura do ar da abertura superior. Individualmente, os protótipos tiveram o mesmo comportamento térmico. Porém, os resultados numéricos do protótipo Trombe foram superiores aos de referência.

Figura 68 – Tabela das temperaturas do ar mínimas e máximas nas aberturas inferiores e superiores do cenário 1.

TEMPERATURA DO AR (°C)						
REFERÊNCIA						
	AB. INF.	DATA	HORA	AB. SUP.	DATA	HORA
MÍNIMA	14,1	13/set	5:45/7:15	14,1	13/set	07:30
MÁXIMA	34,0	24/set	17:45	37,2	19/set	17:00/17:15
TROMBE						
	AB. INF.	DATA	HORA	AB. SUP.	DATA	HORA
MÍNIMA	15,1	13/set	08:00	15,2	13/set	06:15
MÁXIMA	33,3	19/set	17:00	39,5	19/set	16:15

Fonte: A autora, 2015.

4.3.1.1.2 Velocidade do ar

Para as aberturas inferiores as diferenças de velocidades do ar entre os protótipos indicaram que o protótipo referência apresentou, na maior parte do tempo, velocidades superiores. Como as diferenças são mínimas e baixas, podem ter sido ocasionadas por alguma interferência externa (Figura 69). Os dados não foram suficientes para melhores conclusões.

Figura 69 – Tabela das velocidades do ar mínimas e máximas nas aberturas inferiores e superiores do cenário 1.

VELOCIDADE DO AR (m/s)						
REFERÊNCIA						
	AB. INF.	DATA	HORA	AB. SUP.	DATA	HORA
MÍNIMA	0,1	01/set	09:15	0,1	várias	várias
MÁXIMA	0,2	31/ago	19:00	0,2	31/ago	20:00
TROMBE						
	AB. INF.	DATA	HORA	AB. SUP.	DATA	HORA
MÍNIMA	0,1	várias	várias	0,1	várias	várias
MÁXIMA	0,3	31/ago	16:45	0,4	31/ago	14:15

Fonte: A autora, 2015.

4.3.1.2 Coberturas

4.3.1.2.1 Temperatura superficial interna e externa

Graficamente, as temperaturas superficiais internas e externas das coberturas dos protótipos apresentaram-se muito semelhantes. Inclusive nos gráficos das diferenças entre temperaturas internas e externas de cada uma das células.

Os resultados das temperaturas superficiais externas entre os protótipos indicaram uma ligeira vantagem para o protótipo Trombe. Mas, para a comparação das temperaturas internas entre os dois protótipos, o Trombe apresentou valores mais elevados do que o referência.

As diferenças sutis para as temperaturas externas talvez sejam explicadas por possíveis sombreamentos do entorno ou pelo fato de o protótipo Trombe estar implantado num local mais aberto, mais alto e, portanto, mais suscetível a ventos do que o protótipo referência (Figura 70). O local do protótipo Trombe recebe interferência direta do deslocamento de ar provocado pelos automóveis que circulam pela Avenida Prof. Luciano Gualberto.

Para as temperaturas internas mais elevadas no protótipo Trombe há de se considerar a influência da parede térmica nesses resultados.

Figura 70 – Tabela das temperaturas mínimas e máximas superficiais internas e externas das coberturas do cenário 1.

TEMPERATURA SUPERFICIAL COBERTURA (°C)						
REFERÊNCIA						
	INT.	DATA	HORA	EXT.	DATA	HORA
MÍNIMA	14,7	13/set	08:15	9,3	01/set	05:45
MÁXIMA	34,2	19/set	18:15	50,5	19/set	12:30
TROMBE						
	INT.	DATA	HORA	EXT.	DATA	HORA
MÍNIMA	15,2	13/set	7:45;8:15	9,1	01/set	05:45
MÁXIMA	34,0	19/set	18:00;18:15	51,8	20/set	13:30

Fonte: A autora, 2015.

4.3.1.3 Paredes fachada norte

4.3.1.3.1 Temperatura superficial interna e externa

A análise gráfica das temperaturas superficiais internas e externas do protótipo referência registrou que as temperaturas externas foram mais elevadas do que as internas na maioria do período de medição (Figura 71). Nos períodos de temperaturas mais baixas, as temperaturas internas tiveram valores superiores. Pode-se interpretar que valores superiores das temperaturas internas podem significar uma diminuição da liberação de calor interno, uma reversão do sentido de liberação do calor.

Para o protótipo Trombe, as diferenças de temperaturas externas mantiveram-se superiores às internas durante todo o período de medição. Uma leitura desse resultado é que a parede Trombe funcionou como armazenadora de calor durante esse cenário.

A comparação dos resultados indica que o protótipo Trombe apresentou uma eficiência térmica superior para o aquecimento noturno em relação ao protótipo referência no que diz respeito às temperaturas externas e internas das paredes fachada norte, conclusão que pode ser verificada pelo gráfico da figura 72.

Figura 71 – Tabela das temperaturas mínimas e máximas superficiais internas e externas das fachadas norte do cenário 1.

TEMPERATURA SUPERFICIAL PAREDE FACHADA NORTE (°C)						
REFERÊNCIA						
	INT.	DATA	HORA	EXT.	DATA	HORA
MÍNIMA	13,9	13/set	6:30/7:15	13,3	13/set	02:00
MÁXIMA	36,5	19/set	16:30;16:45	45,3	19/set	15:00
TROMBE						
	INT.	DATA	HORA	EXT.	DATA	HORA
MÍNIMA	16,0	13e14/set	8:00/8:00	16,0	13/set	6:15;6:30
MÁXIMA	33,1	19/set	18:00	50,6	31/ago	15:30;15:45

Fonte: A autora, 2015.

Figura 72 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas das paredes fachada norte dos protótipos referência e Trombe no cenário 1 (°C).

Fonte: A autora, 2015.

A análise comparativa entre as imagens executadas às 18h do dia 24 de setembro com a câmera termovisora confirma a superioridade térmica da parede de massa do sistema Trombe sobre a parede fachada norte do protótipo referência para esse cenário (Figuras 73 e 74).

Figuras 73 e 74 – Imagem termográfica executada nas fachadas internas das fachadas norte no protótipo referência e no Trombe, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015.

4.3.1.4 Vidro

4.3.1.4.1 Temperatura superficial interna e externa

As temperaturas superficiais internas foram superiores às superficiais externas durante todo o período de medição, confirmando o efeito estufa do sistema (Figura 75).

Figura 75 – Tabela das temperaturas mínimas e máximas superficiais internas e externas do vidro do cenário 1.

TEMPERATURA SUPERFICIAL VIDRO (°C)						
TROMBE						
	INT.	DATA	HORA	EXT.	DATA	HORA
MÍNIMA	14,6	13/set	6:00;6:15	14,2	13/set	04:45
MÁXIMA	47,0	19/set	15:00	45,0	20/set	14:30

Fonte: A autora, 2015.

4.3.1.5 Tripés

Seguem abaixo as análises de temperatura de ar, velocidade de ar, temperatura de globo e umidade de ar registradas nos tripés.

4.3.1.5.1 Temperatura do ar

Observou-se uma semelhança gráfica entre as temperaturas superficiais internas das coberturas e as temperaturas do ar nos tripés. As diferenças notadas foram principalmente nas amplitudes térmicas, que foram superiores nos tripés em relação às coberturas, favorecendo, assim, o cenário de aquecimento noturno. A superioridade das temperaturas nos tripés pode ser justificada pela contribuição das paredes da fachada norte (Figura 76). Quanto à similaridade gráfica, talvez seja explicada pela proximidade entre os instrumentos internos das coberturas e os instrumentos dos tripés.

Na comparação entre as temperaturas do ar nos tripés o protótipo Trombe apresentou valores mais elevados principalmente em dias de temperaturas mais baixas.

Figura 76 – Tabela das temperaturas do ar mínimas e máximas nos tripés do cenário 1.

TRIPÉ						
TEMPERATURA DO AR (°C)						
	REFERÊNCIA			TROMBE		
	VALOR	DATA	HORA	VALOR	DATA	HORA
MÍNIMA	14,6	13/set	6:30;7:30	15,0	13/set	7:00;7:30
MÁXIMA	35,6	19/set	17:30;17:45	34,9	19/set	17:30

Fonte: A autora, 2015.

4.3.1.5.2 Temperatura de globo

As diferenças entre as temperaturas de globo dos tripés foram relativamente baixas, mas indicam temperaturas superiores no Trombe. Foram identificadas diferenças de 1,5 °C. Considerando que a temperatura de globo avalia a exposição ocupacional ao calor, para aquecimento noturno as temperaturas de globo do Trombe demonstram melhores resultados do que o protótipo referência (Figura 77).

Figura 77 – Tabela das temperaturas de globos mínimas e máximas nos tripés do cenário 1.

TRIPÉ						
TEMPERATURA DE GLOBO (°C)						
	REFERÊNCIA			TROMBE		
	VALOR	DATA	HORA	VALOR	DATA	HORA
MÍNIMA	14,3	13/set	6:30;7:30	14,8	13/set	7:00;7:15
MÁXIMA	35,2	19/set	17:30	34,8	19/set	17:30

Fonte: A autora, 2015.

4.3.1.5.3 Umidade relativa do ar

A umidade relativa do tripé referência apresentou-se superior à do tripé do Trombe no primeiro terço das medições (Figura 78). Nesse período as duas medições registraram um aumento contínuo e crescente. Desse ponto em diante as medições foram praticamente todas de 100% para ambos os protótipos. As diferenças, quando ocorreram, indicaram uma umidade relativa no referência superior ao Trombe, situação que pode ter sua explicação na configuração de total fechamento do protótipo referência e pela existência de um termo circulação no Trombe. Essa diferenciação favoreceu o protótipo Trombe, mas é necessária a execução de mais investigações, pois as umidades relativas estiveram muito altas.

Figura 78 – Tabela das umidades relativas mínimas e máximas nos tripés do cenário 1.

TRIPÉ						
UMIDADE RELATIVA (%)						
	REFERÊNCIA			TROMBE		
	VALOR	DATA	HORA	VALOR	DATA	HORA
MÍNIMA	37	31/ago	16:45	14	31/ago	16:45
MÁXIMA	100	várias	várias	100	várias	várias

Fonte: A autora, 2015.

4.3.1.5.4 Velocidade do ar

Não houve medição de 18 a 21 de setembro por falta de energia elétrica. O gráfico indicou que as velocidades do ar nos tripés, mínimas, são iguais entre os protótipos, mas a máxima da Trombe foi superior à máxima do referência, conforme figura 79 abaixo.

O comportamento da velocidade do ar nos tripés praticamente se manteve constante e linear. As medições do Trombe se mostraram ligeiramente superiores às do referência (Figura 80), diferença que pode ter sido ocasionada pela termo circulação do protótipo Trombe.

Figura 79 – Tabela das velocidades do ar mínimas e máximas nos tripés do cenário 1.

TRIPÉ						
VELOCIDADE DO AR (m/s)						
	REFERÊNCIA			TROMBE		
	VALOR	DATA	HORA	VALOR	DATA	HORA
MÍNIMA	0,1	várias	várias	0,1	14e26/set	10:45;1:15
MÁXIMA	0,1	26/set	08:45	0,1	31/ago	03:45

Fonte: A autora, 2015.

Figura 80 – Gráfico das velocidades do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa III, cenário 1 (m/s).

Fonte: A autora, 2015.

4.3.1.6 Conclusão do cenário 1

O protótipo Trombe apresentou eficiência térmica para o aquecimento noturno em períodos de temperaturas baixas superior ao protótipo referência.

4.3.2 Resultados do cenário 2 para aquecimento passivo noturno

O cenário 2 foi monitorado de 28 de setembro a 19 de outubro de 2015. A temperatura média externa do período foi de 22,3 °C, a mínima externa foi de 15,6 °C às 23h do dia 5 de outubro e a máxima externa foi de 36,6 °C às 14h do dia 15 de outubro. Para esse cenário, o protótipo referência e o protótipo Trombe estiveram com todas as aberturas fechadas.

4.3.2.1 Aberturas superiores e inferiores

4.3.2.1.1 Temperatura do ar

A análise gráfica das diferenças entre as temperaturas nas aberturas inferiores dos protótipos Trombe e referência registrou uma superioridade do Trombe sobre o referência principalmente em períodos de temperaturas mais baixas e um resultado mais favorável ao referência sobre o Trombe em períodos de temperaturas mais altas.

A análise das diferenças de temperatura do ar nas aberturas superiores entre os protótipos indicou que o referência registrou resultados mais altos para períodos de temperaturas mais altas, e o Trombe apresentou temperaturas mais altas do que o referência nas aberturas superiores em períodos de temperaturas mais baixas.

Para um cenário de aquecimento, os resultados da análise de temperaturas do ar nas aberturas inferiores e superiores indicaram melhores resultados no protótipo Trombe, pois foram obtidos valores mais altos justamente em períodos de temperaturas mais baixas (Figura 81).

Figura 81 – Tabela das temperaturas do ar mínimas e máximas nas aberturas inferiores e superiores do cenário 2.

TEMPERATURA DO AR (°C)						
REFERÊNCIA						
	AB. INF.	DATA	HORA	AB. SUP.	DATA	HORA
MÍNIMA	17,9	06/out	07:45	18,1	06/out	08:45
MÁXIMA	34	15/out	17:45	35,8	15/out	18:15
TROMBE						
	AB. INF.	DATA	HORA	AB. SUP.	DATA	HORA
MÍNIMA	19,3	06/out	08:15	19,1	05/out	08:45
MÁXIMA	31,4	15/out	18:00	32,2	15/out	18:15

Fonte: A autora, 2015.

4.3.2.1.2 Velocidade do ar

As velocidades do ar nas aberturas inferiores do protótipo Trombe e do referência apresentaram resultados superiores para o protótipo referência (Figura 82). Uma elevação brusca nos registros ocorreu no dia 16 de outubro e, possivelmente, foi ocasionada por interferência externa. Acredita-se que a tampa de fechamento da abertura de ventilação do protótipo referência tenha sido deslocada o suficiente para alterar as medições pretendidas desse ponto.

Quanto à velocidade do ar nas aberturas superiores, inicialmente o protótipo referência apresentava resultados superiores e as diferenças praticamente eram constantes. A partir do dia 6 de outubro a velocidade do ar na abertura superior do Trombe foi aumentando lenta e gradativamente até alcançar as velocidades registradas no protótipo referência e as duas manterem os mesmos valores até o final das medições.

Se tomarmos como seguras as medições do início do período, o protótipo referência apresentou resultados superiores para a velocidade do ar tanto nas aberturas inferiores quanto nas superiores. Para um cenário de aquecimento noturno, o protótipo Trombe se beneficia pelo fato de as velocidades do ar serem mais baixas.

Figura 82 – Tabela das velocidades do ar mínimas e máximas nas aberturas inferiores e superiores do cenário 2.

VELOCIDADE DO AR (m/s)						
REFERÊNCIA						
	AB. INF.	DATA	HORA	AB. SUP.	DATA	HORA
MÍNIMA	0,1	06/out	2:30/10:15	0,1	várias	várias
MÁXIMA	0,4	19/out	09:00	0,1	várias	várias
TROMBE						
	AB. INF.	DATA	HORA	AB. SUP.	DATA	HORA
MÍNIMA	0,1	19/out	7:15;9:00	0,0	19/out	7:15;7:30
MÁXIMA	0,1	várias	várias	0,1	várias	várias

Fonte: A autora, 2015.

4.3.2.2 Coberturas

4.3.2.2.1 Temperatura superficial interna e externa

A comparação gráfica dos resultados individuais das temperaturas superficiais internas e externas das coberturas indica um comportamento muito semelhante entre os protótipos. As baixas amplitudes térmicas das temperaturas superficiais internas e os atrasos térmicos registrados comprovam a contribuição com o desempenho térmico nos dois protótipos.

Contudo, a análise gráfica das diferenças das temperaturas internas entre os protótipos indica que as temperaturas superficiais internas da cobertura do Trombe foram superiores ao protótipo referência. E a análise das diferenças das temperaturas superficiais externas das coberturas também indica que foram superiores no protótipo Trombe (Figura 83).

Acredita-se que as considerações efetuadas para as temperaturas superficiais internas e externas das coberturas no cenário 1 são pertinentes ao cenário 2.

Figura 83 – Tabela das temperaturas superficiais internas e externas mínimas e máximas nas aberturas inferiores e superiores do cenário 2.

TEMPERATURA SUPERFICIAL COBERTURA (°C)						
REFERÊNCIA						
	INT.	DATA	HORA	EXT.	DATA	HORA
MÍNIMA	18,2	05/out	8:15;8:45	12,4	07/out	05:00
MÁXIMA	33,3	15/out	18:15	51,2	16/out	11:00
TROMBE						
	INT.	DATA	HORA	EXT.	DATA	HORA
MÍNIMA	19,5	05/out	09:15	12,4	07/out	06:00
MÁXIMA	32,0	15/out	18:45	51,4	16/out	12:00

Fonte: A autora, 2015.

4.3.2.3 Paredes fachada norte

4.3.2.3.1 Temperatura superficial interna e externa

A análise gráfica das diferenças das temperaturas superficiais internas das paredes norte indicou um registro superior no protótipo Trombe. Além de as diferenças favorecerem o Trombe, o gráfico indicou que, para temperaturas mais baixas, as temperaturas máximas internas do protótipo referência não atingiram as mínimas temperaturas superficiais internas do Trombe. Os atrasos térmicos do Trombe foram superiores aos do referência.

Para as temperaturas superficiais externas também prevaleceu uma superioridade de temperatura no protótipo Trombe. As diferenças chegaram a ultrapassar 8 °C e o gráfico indica que o sistema Trombe funcionou praticamente todo o período na função de armazenamento.

Essas duas análises complementam-se e reforçam o potencial para o aquecimento no interior do protótipo Trombe nesse cenário (Figura 84).

Figura 84 – Tabela das temperaturas superficiais internas e externas mínimas e máximas das fachadas norte do cenário 2.

TEMPERATURA SUPERFICIAL PAREDE FACHADA NORTE (°C)						
REFERÊNCIA						
	INT.	DATA	HORA	EXT.	DATA	HORA
MÍNIMA	17,7	06/out	07:30	16,6	06/out	04:45
MÁXIMA	35,8	15/out	17:15;17:30	41,4	15/out	14:15
TROMBE						
	INT.	DATA	HORA	EXT.	DATA	HORA
MÍNIMA	20,4	05/out	9:15;10:00	20,8	05/out	06:15
MÁXIMA	31,2	16/out	17:30	43,4	08/out	16:00

Fonte: A autora, 2015.

A seguir apresenta-se uma sequência de imagens termográficas executadas em períodos de 4 horas nas superfícies internas das paredes norte dos dois protótipos. Nas duas superiores os registros indicaram que a temperatura máxima do protótipo referência estava superior em 0,1 °C em relação à máxima do Trombe e que a mínima temperatura superficial do referência estava mais alta que a mínima do Trombe em 1,2 °C para o horário das 20h. As temperaturas superficiais internas nessa área do referência estavam superiores às temperaturas internas da área correspondente no Trombe (Figuras 85 e 86).

Figuras 85 e 86– Imagens termovisoras das superfícies internas das paredes norte dos protótipos referência e Trombe, respectivamente, executadas às 20h do dia 8 de outubro.

Fonte: A autora, 2015.

Para o horário das 24h, a máxima do referência foi de 28,1°C e a do Trombe já se mostrava superior, com 30 °C, sendo que a mínima do referência foi de 26,5 °C, enquanto a do Trombe já estava superior, com 26,8°C (Figuras 87 e 88).

Figuras 87 e 88 – Imagens termovisoras das superfícies internas das paredes norte dos protótipos referência e Trombe, respectivamente, executadas às 24h do dia 8 de outubro.

Fonte: A autora, 2015.

Às 4h, a diferença entre as máximas dos protótipos já superava 3°C a favor do protótipo Trombe, e a diferença das mínimas registrou 1,2 °C também a favor do Trombe (Figuras 89 e 90).

Figuras 89 e 90– Imagens termovisoras das superfícies internas das paredes norte dos protótipos referência e Trombe, respectivamente, executadas às 4h do dia 9 de outubro.

Fonte: A autora, 2015.

A sequência acima indica claramente, por meio de imagens termográficas, a desvantagem da fachada norte do protótipo referência em relação à fachada norte do protótipo Trombe quanto ao aquecimento noturno. As imagens contribuem para as conclusões executadas a partir dos resultados gráficos.

4.3.2.4 Vidro

4.3.2.4.1 Temperatura superficial interna e externa

O gráfico das diferenças entre as temperaturas máximas e mínimas da superfície interna e externa do vidro, do sistema Trombe, registrou temperaturas superiores para a superfície interna, condição que contribui com o sistema Trombe para o aquecimento (Figura 91).

Figura 91 – Tabela das temperaturas superficiais mínimas e máximas do vidro do sistema Trombe do cenário 2.

TEMPERATURA SUPERFICIAL VIDRO (°C)						
TROMBE						
	INT.	DATA	HORA	EXT.	DATA	HORA
MÍNIMA	18,4	06/out	04:45	17,3	07/out	06:00
MÁXIMA	44,3	15/out	14:15	42,1	15/out	14:15

Fonte: A autora, 2015.

4.3.2.5 Tripés

4.3.2.5.1 Temperatura do ar

Observou-se no gráfico das diferenças das temperaturas do ar nos tripés dos protótipos Trombe e referência que, para temperaturas baixas, o protótipo Trombe demonstrou resultados superiores, e para temperaturas mais altas, o protótipo referência obteve resultados superiores ao Trombe. Essa análise favorece as condições para o aquecimento noturno do cenário 2 (Figura 92).

Notou-se novamente uma semelhança gráfica entre as temperaturas superficiais internas das coberturas e as temperaturas do ar nos tripés.

Figura 92 – Tabela das temperaturas superficiais mínimas e máximas do vidro do sistema Trombe do cenário 2.

TRIPÉ						
TEMPERATURA DO AR (°C)						
	REFERÊNCIA			TROMBE		
	VALOR	DATA	HORA	VALOR	DATA	HORA
MÍNIMA	18,4	19/out	7:00;7:15	19,0	19/out	7:15;7:30
MÁXIMA	35,0	15/out	5:45;6:00	33,1	15/out	6:00;6:15

Fonte: A autora, 2015.

4.3.2.5.2 Temperatura de globo

Observou-se uma semelhança grande do comportamento térmico apresentado nos gráficos das temperaturas de globo com as temperaturas de ar nos tripés e, conseqüentemente, com as temperaturas superficiais internas das coberturas.

As diferenças entre as mínimas das temperaturas de globo em cada protótipo indicaram valores superiores para o protótipo Trombe. Para as máximas, essa diferença favoreceu o protótipo referência. Os gráficos apresentaram amplitudes térmicas semelhantes e muito próximas em valores. Para temperaturas menores, o gráfico das diferenças sugere melhor desempenho térmico no protótipo Trombe, possivelmente justificado pela presença da parede térmica (Figura 93).

A diferença das máximas temperaturas de globo, entre o Trombe e o referência, apresentou um limite máximo e relativamente constante em torno de 0,7 °C, conforme gráfico a seguir na figura 94.

Figura 93 – Tabela das temperaturas mínimas e máximas de globo nos tripés do cenário 2.

TRIPÉ						
TEMPERATURA DE GLOBO (°C)						
	REFERÊNCIA			TROMBE		
	VALOR	DATA	HORA	VALOR	DATA	HORA
MÍNIMA	17,6	19/out	06:45	18,8	19/out	7:00;7:15
MÁXIMA	34,9	15/out	17:30;17:45	33,1	15/out	18:00

Fonte: A autora, 2015.

Figura 94 – Gráfico das diferenças das temperaturas de globos do protótipo Trombe e do protótipo referência na etapa III, cenário 2 (°C).

Fonte: A autora, 2015.

4.3.2.5.3 Umidade relativa do ar

As umidades relativas nos tripés do protótipos apresentaram um crescimento quase que imediato ao fechamento dos protótipos e início das medições. Atingiram rapidamente 100% e mantiveram essas umidades até o término das medições. Não foram encontrados dados suficientes para a compreensão desse comportamento (Figura 95).

Figura 95 – Tabela das umidades mínimas e máximas relativas nos tripés do cenário 2.

TRIPÉ						
UMIDADE RELATIVA (%)						
	REFERÊNCIA			TROMBE		
	VALOR	DATA	HORA	VALOR	DATA	HORA
MÍNIMA	96	19/out	09:00	92	19/out	08:30
MÁXIMA	100	várias	várias	100	várias	várias

Fonte: A autora, 2015.

4.3.2.5.4 Velocidade do ar

A velocidade do ar no tripé do protótipo Trombe apresentou resultados superiores em relação ao protótipo referência (Figura 96). As diferenças entre as velocidades do ar no tripé foram praticamente constantes do início ao término das medições, conforme mostra a figura 97a seguir.

Figura 96 – Tabela das velocidades do ar mínimas e máximas nos tripés do cenário 2.

TRIPÉ						
VELOCIDADE DO AR (m/s)						
	REFERÊNCIA			TROMBE		
	VALOR	DATA	HORA	VALOR	DATA	HORA
MÍNIMA	0,1	várias	várias	0,1	06/out	6:16;6:30
MÁXIMA	0,1	29/set e 18/out	4:00/7:30	0,1	08/out	04:45

Fonte: A autora, 2015.

Figura 97 – Gráfico das velocidades do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe etapa III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.3.2.6 Conclusão do cenário 2

A pesquisa confirmou a eficiência térmica do protótipo Trombe para o aquecimento noturno em períodos de temperaturas mais baixas. O cenário 2 apresentou melhores resultados gráficos para o aquecimento noturno do que o cenário 1.

4.3.3 Resultados do cenário 3 para arrefecimento passivo diurno

O cenário 3 foi monitorado de 19 de outubro a 25 de novembro de 2015. A temperatura média externa do período foi de 22,4°C, a mínima externa foi de 16,3 °C às 2h do dia 19 de novembro e a máxima externa foi de 35,6 °C às 14h do dia 20 de outubro. Para esse cenário, a configuração do protótipo referência apresentou a ventilação na porta da fachada sul aberta e as aberturas de ventilação superiores da fachada norte abertas. O protótipo Trombe apresentou a ventilação da porta da fachada sul aberta, as aberturas de ventilação

inferiores, da parede térmica, abertas e a saída de ar do vidro aberta. As demais aberturas mantiveram-se fechadas nos dois protótipos.

4.3.3.1 Abertura superior e inferior

4.3.3.1.1 Temperatura do ar

O gráfico das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo referência indicou valores mais elevados para as aberturas superiores. Para o protótipo Trombe, o gráfico das diferenças indicou que a abertura superior obteve um resultado mais elevado.

Graficamente, os valores das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas inferiores resultaram em valores superiores para o protótipo Trombe. Além da superioridade, a configuração gráfica apresenta-se com uma amplitude térmica constante e regular.

Para as aberturas superiores, o gráfico das diferenças de temperaturas do ar registrou valores superiores para o protótipo Trombe (Figura 98). Notou-se que os resultados aconteceram dentro de uma faixa de diferença relativamente constante, variando entre 0°C e 2°C. O resultado está condizente com o fato de as aberturas superiores do Trombe estarem fechadas e as do protótipo referência estarem abertas nesse cenário.

Figura 98 – Tabela das temperaturas do ar mínimas e máximas nas aberturas inferiores e superiores do cenário 3.

TEMPERATURA DO AR (°C)						
REFERÊNCIA						
	AB. INF.	DATA	HORA	AB. SUP.	DATA	HORA
MÍNIMA	18,0	26/out	07:15	17,3	26/out	02:30
MÁXIMA	32,6	20/out	05:45	33,6	20/out	16:30
TROMBE						
	AB. INF.	DATA	HORA	AB. SUP.	DATA	HORA
MÍNIMA	18	26/out e 25/nov	3:30/4:30	19,2	26/out	08:30
MÁXIMA	34,9	20/out	17:15	30,8	19/nov	19:00

Fonte: A autora, 2015.

4.3.3.1.2 Velocidade do ar

Para as velocidades do ar, entre as aberturas dos protótipos, a interpretação dos gráficos indica que no protótipo referência as velocidades foram mais elevadas nas aberturas superiores. A maior diferença registrada entre as aberturas superiores foi de 1,7 m/s.

No protótipo Trombe os registros de velocidades do ar, em comparação com o referência, indicaram valores mais elevados para as aberturas inferiores. A maior diferença registrada entre as aberturas inferiores foi de 3,4m/s (Figura 99).

A comparação do comportamento das velocidades do ar nas aberturas entre os protótipos indica uma condição de troca de ar superior no protótipo Trombe.

Figura 99 – Tabela das velocidades do ar mínimas e máximas nas aberturas inferiores e superiores do cenário 3.

VELOCIDADE DO AR (m/s)						
REFERÊNCIA						
	AB. INF.	DATA	HORA	AB. SUP.	DATA	HORA
MÍNIMA	0,1	20/out e 16/11	várias	0,0	várias	várias
MÁXIMA	0,3	19/out	13:00	2,6	19/out	11:00
TROMBE						
	AB. INF.	DATA	HORA	AB. SUP.	DATA	HORA
MÍNIMA	0,1	várias	várias	0,0	30/out	6:15;7:15
MÁXIMA	3,7	20/nov	14:15	0,1	26/out	15:00

Fonte: A autora, 2015.

4.3.3.2 Coberturas

4.3.3.2.1 Temperatura superficial interna e externa

A princípio, o protótipo Trombe ficou sem medição de 8 a 16 de novembro para esta grandeza. Porém, percebeu-se que, além dessa falha, houve outra mais comprometedora, pois se constatou uma defasagem com duplicidade de medidas para as duas medições, internas e externas. O erro foi discutido com o responsável pelos instrumentos e medições, mas, como não houve

possibilidade de detectar sua origem e uma possibilidade segura de resolver a situação, optou-se por desprezar essas medições específicas.

4.3.3.3 Paredes fachada norte

4.3.3.3.1 Temperatura superficial interna e externa

As diferenças das temperaturas superficiais externas e internas da parede fachada norte do referênciã indicaram temperaturas externas superiores às internas. Situação de armazenamento de energia. Essa diferença alcançou 10 °C. As temperaturas superficiais internas estiveram superiores às externas por períodos bem menores, e a maior diferença registrada foi de 4 °C. Com esse comportamento, e analisada isoladamente, a parede norte do referênciã indica uma eficiência para o aquecimento.

As diferenças entre temperaturas superficiais externas e internas da fachada norte do Trombe indicaram temperaturas mais elevadas na superfície externa do que na interna em praticamente toda a medição. Esse comportamento, analisado isoladamente, também indica potencial para sistemas passivos de aquecimento.

Temperaturas superficiais altas podem contribuir com o arrefecimento se o sistema de ventilação for adequado.

Figura 100 – Tabela das temperaturas superficiais mínimas e máximas da parede fachada norte do cenário 3.

TEMPERATURA SUPERFICIAL PAREDE FACHADA NORTE (°C)						
REFERÊNCIA						
	INT.	DATA	HORA	EXT.	DATA	HORA
MÍNIMA	17,5	25/out	07:30	16,6	25/out	06:15
MÁXIMA	34,5	20/out	18:15	40,8	20/out	15:00;15:15
TROMBE						
	INT.	DATA	HORA	EXT.	DATA	HORA
MÍNIMA	20,0	26/out	09:00	19,8	26/out	06:45
MÁXIMA	29,3	12/nov	18:45	38,9	21/out	16:00

Fonte: A autora, 2015.

4.3.3.4 Vidro

4.3.3.4.1 Temperatura superficial interna e externa

As diferenças das temperaturas superficiais externas e internas do vidro no Trombe indicaram que, apesar de as aberturas de ventilação inferiores estarem abertas e a saída de ar da caixa de ar também, as temperaturas internas do vidro foram superiores às externas, ou seja, a caixa de ar manteve o papel de coletor térmico.

Para uma situação de arrefecimento, esse comportamento não se apresenta favorável se analisado isoladamente mas é favorável quando consideramos o efeito chaminé.

Figura101 – Tabela das temperaturas superficiais mínimas e máximas do vidro do sistema Trombe do cenário 3.

TEMPERATURA SUPERFICIAL VIDRO (°C)						
TROMBE						
	INT.	DATA	HORA	EXT.	DATA	HORA
MÍNIMA	17,6	26/out	06:30	17,2	26/out	2:30/3:30/ 5:30
MÁXIMA	41,4	20/out	15:00	41,0	20/out	15:00

Fonte: A autora, 2015

4.3.3.5 Tripés

4.3.3.5.1 Temperatura do ar

As diferenças das temperaturas do ar nos tripés entre os protótipos indicam que as temperaturas foram superiores no Trombe.

Figura 102 – Tabela das temperaturas do ar mínimas e máximas nos tripés do cenário 3.

TRIPÉ						
TEMPERATURA DO AR (°C)						
	REFERÊNCIA			TROMBE		
	VALOR	DATA	HORA	VALOR	DATA	HORA
MÍNIMA	18,3	25 e 26/out	7:00;7:15/ 8:00;8:15	18,8	26/out	08:00
MÁXIMA	32,7	20/out	18:30	31,7	19/nov	18:45

Fonte: A autora, 2015 .

4.3.3.5.2 Temperatura de globo

As diferenças entre as temperaturas de globo nos tripés indicam que foi mais elevada no Trombe e que essa elevação apresentou uma diferença máxima de 1 °C para o período. Para um comportamento térmico que busca o arrefecimento, o protótipo referência mostrou-se com condições mais adequadas para a grandeza de temperatura de globo.

Figura 103 – Tabela das temperaturas de globo mínimas e máximas nos tripés do cenário 3.

TRIPÉ						
TEMPERATURA DE GLOBO (°C)						
	REFERÊNCIA			TROMBE		
	VALOR	DATA	HORA	VALOR	DATA	HORA
MÍNIMA	18,1	25/out	08:00	18,7	26/out	7:00;800
MÁXIMA	32,6	20/out	18:30	31,7	19/nov	18:30

Fonte: A autora, 2015.

4.3.3.5.3 Umidade relativa do ar

As umidades relativas nos tripés entre os protótipos foram superiores no protótipo referência. O valor máximo do Trombe foi de 98% e o do referência atingiu 100% várias vezes.

Figura 104 – Tabela das umidades relativas mínimas e máximas nos tripés do cenário 3.

TRIPÉ						
UMIDADE RELATIVA (%)						
	REFERÊNCIA			TROMBE		
	VALOR	DATA	HORA	VALOR	DATA	HORA
MÍNIMA	72	19/nov	19:00	67	19/nov	05:00
MÁXIMA	100	várias	várias	100	19/out	10:45

Fonte: A autora, 2015.

4.3.3.5.4 Velocidade do ar

As diferenças das velocidades do ar nos tripés indicaram um favorecimento do protótipo Trombe. Apresentou maior quantidade de picos com valores mais elevados.

Figura 105 – Tabela das velocidades do ar mínimas e máximas nos tripés do cenário 3.

TRIPÉ						
VELOCIDADE DO AR (m/s)						
	REFERÊNCIA			TROMBE		
	VALOR	DATA	HORA	VALOR	DATA	HORA
MÍNIMA	0,1	várias	várias	0,1	várias	várias
MÁXIMA	0,2	19/out	15:45	0,2	09/nov	13:15

Fonte: A autora, 2015.

Para verificar o comportamento das liberações de calor nas paredes internas dos protótipos, foram analisadas imagens termográficas sequenciais com intervalos de 4 horas. Definiu-se que um desses horários deveria ser de 12 horas para situar a análise no período mais quente do dia.

No primeiro horário, 8h do horário de verão, do dia 23 de novembro, a temperatura média da imagem do referência apresentou o valor de 20,9 °C, e para o Trombe esse registro foi de 23 °C (Figuras 106 e 107).

Figuras 106 e 107 – Imagens termovisoras das superfícies internas das paredes norte dos protótipos referência e Trombe, respectivamente, executadas às 8h do dia 23 de novembro de 2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Para as 12h, em horário de verão, a temperatura média da imagem do protótipo referência indicou 21,7 °C, e para o protótipo Trombe a média registrada foi de 23,4 °C (Figuras 108 e 109).

Figuras 108 e 109 – Imagens termovisoras das superfícies internas das paredes norte dos protótipos referência e Trombe, respectivamente, executadas às 12h do dia 23 de novembro de 2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Às 16h, em horário de verão, as temperaturas médias se igualaram conforme registrado nas figuras 110 e 111.

Figuras 110 e 111 – Imagens termovisoras das superfícies internas das paredes norte dos protótipos referência e Trombe, respectivamente, executadas às 16h do dia 23 de novembro de 2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

O resultado da análise termográfica indicou que, comparativamente, o protótipo referência apresentou melhores comportamentos térmicos para o arrefecimento diurno em relação ao protótipo Trombe.

4.3.3.6 Conclusões para o cenário 3

O protótipo Trombe apresentou valores relevantes para as velocidades do ar, mas também apresentou temperaturas superficiais mais altas que no protótipo referência. A pesquisa confirmou o potencial de arrefecimento diurno, mas não permite mensurar esse valor por meio de análises gráficas. As análises termográficas indicaram que, para o arrefecimento, o protótipo referência apresentou uma eficiência térmica melhor.

4.4 Dias mais frios dos cenários de aquecimento e dia mais quente do cenário de arrefecimento

A pesquisa estudou cenários específicos para o aquecimento noturno, por meio dos cenários 1 e 2, e para o arrefecimento noturno, no cenário 3. Dentro de cada período foi levantada a situação mais desfavorável de cada cenário, ou seja, para o cenário 1 e 2 a noite subsequente ao dia mais frio e para o cenário 3 o dia mais quente do período. A análise considerou as temperaturas superficiais internas e externas das paredes face norte dos protótipos em relação as temperaturas externas registradas. Foram incluídos o dia anterior e o posterior para melhor compreensão do desenvolvimento do comportamento térmico no dia específico. No intuito de facilitar a identificação, foi adotado o termo “armazenamento” como o período em que as temperaturas superficiais externas foram superiores às temperaturas superficiais internas, é o armazenamento de calor na massa da parede; e o termo “aquecimento” como o período em que as temperaturas superficiais internas foram superiores às temperaturas superficiais externas, é o aquecimento do ambiente interno a partir do calor liberado pela parede. Deve-se considerar, com essa adoção, que os períodos de armazenamentos e de aquecimentos não são isolados, mas concomitantes. A liberação de calor para o aquecimento é concomitante com o

armazenamento a partir do momento em que a energia armazenada percorre a espessura da parede de massa e atinge a superfície interna do ambiente interno.

4.4.1 Dia mais frio do cenário 1

O período deste cenário foi de 31 de agosto a 28 de setembro de 2015. O dia mais frio do cenário 1 foi dia 12 de setembro de 2015 com uma temperatura média de 14,7 °C. A temperatura mais baixa, de 13,55 °C, foi registrada às 23h.

4.4.1.1 Fachada norte do protótipo referência

Na parede norte do protótipo referência foi registrado, no dia 11 de setembro, da 1h às 7h, um período de aquecimento, em que a maior diferença foi de 0,8 °C à 1h e a menor foi de 0,3 °C às 4h e às 6h. Das 8h às 14h ocorreu um armazenamento, em que a maior diferença verificada foi de 3,4 °C às 10h e a menor foi de 0,3 °C às 8h. Do dia 11 para o dia 12, das 15h às 9h, ocorreu um período de aquecimento, com a maior diferença de temperaturas registrada de 2,5 °C às 18h e a menor de 0,1 °C às 9h. No dia 12, das 10h às 12h, houve um armazenamento, com a maior diferença de 0,8 °C às 11:00h e a menor de 0,3 °C às 12:00h. Das 13h do dia 12 até as 7h do dia 13 ocorreu um período de aquecimento, sendo a maior diferença de 1,3 °C às 7h e a menor de 0,1 °C às 14h. No dia 13, das 8h às 15h, ocorreu um armazenamento em que a maior diferença de temperaturas foi de 2,2 °C às 10h e a menor diferença foi de 0,3 °C às 15h. Das 14h às 23h houve um período de aquecimento com a maior diferença de temperaturas com 1,2 °C às 20h e a menor de 0,8 °C às 23h.

O comportamento térmico da parede norte do protótipo referência mostrou-se irregular nesses sete períodos. Foram 6 horas noturnas de aquecimento, 6 horas diurnas de armazenamento de calor, 18 horas de aquecimento, 2 horas de armazenamento de calor, 18 horas de aquecimento, 7 horas diurnas de armazenamento e 7 horas noturnas de aquecimento. Para um aquecimento noturno, mostrou-se inadequado. Ocorreram períodos diurnos curtos de armazenamento de calor e períodos de aquecimento longos que abrangeram

parte do dia e a noite. Não apresentou padrão de horário para a transição do armazenamento para o aquecimento.

4.4.1.2 Fachada norte do protótipo Trombe ou parede Trombe

Quanto às temperaturas superficiais internas e externas da parede Trombe, a análise dos gráficos mostrou que, durante 19 horas no dia 11 de setembro, da 1h às 20h, ocorreu um armazenamento, sendo a maior diferença de 4 °C às 13h e a menor diferença de 0,1 °C às 5h. Às 21h a diferença foi de 0 °C. Das 22h do dia 11 às 7h do dia 12 ocorreu um aquecimento, sendo que o registro máximo das diferenças foi de 0,3 °C às 6h e a diferença mínima foi de 0,1 °C às 22h. Das 8h às 20h do dia 12 ocorreu um armazenamento com a máxima diferença de 1,6 °C às 11h e a mínima de 0,1 °C às 20h. Às 21h não houve diferença entre as temperaturas superficiais. Das 22h do dia 12 às 7h do dia 13 ocorreu um aquecimento com a máxima diferença de 0,2 °C às 6h e a mínima de 0,1 °C às 7h. Das 8h às 23h ocorreu um armazenamento com uma diferença máxima de 3,3 °C às 13h e uma diferença mínima de 0,1 °C às 23h.

O comportamento térmico da parede norte do protótipo Trombe mostrou-se regular em cinco períodos. Na sequência, foram registradas 19 horas diurnas de armazenamento na parede térmica, 1 ponto de igualdade entre as temperaturas, 9 horas noturnas de aquecimento, 12 horas diurnas de armazenamento na parede térmica, 1 ponto de igualdade entre as temperaturas, 9 horas noturnas de aquecimento e 15 horas diurnas de armazenamento. Apresentou um comportamento térmico adequado para um aquecimento noturno em que os períodos de armazenamentos diurnos foram extensos e contínuos, e os períodos de aquecimento noturno ocorreram em horário apropriado, das 22h às 7h, conforme mostra o gráfico na figura 112 a seguir. Os horários das 7h e das 21h apresentaram-se como marcos de transição de comportamento térmico, de armazenamento para aquecimento, e vice-versa, horários em que o registro da diferença entre as temperaturas superficiais foi de 0 °C. É relevante observar visualmente no gráfico o comportamento térmico dos períodos noturnos quando as diferenças de

temperaturas foram praticamente inexistentes, por um período longo, proporcionando uma estabilidade térmica na parede de massa.

Figura 112 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas das paredes norte no dia mais frio do cenário 1 (°C).

Fonte: A autora, 2015.

4.4.1.3 Conclusão do dia mais frio do cenário 1

A comparação entre os comportamentos térmicos para o cenário 1 entre os 2 protótipos, do ponto de vista da análise das temperaturas superficiais internas e externas, indicou que o protótipo Trombe apresentou um comportamento térmico eficiente para o aquecimento noturno passivo em relação ao protótipo referência. A defasagem de tempo entre a menor temperatura registrada externamente e as menores temperaturas superficiais internas foi de oito horas nos dois protótipos. A diferença da menor temperatura superficial interna da parede norte do protótipo referência e a menor temperatura externa foi de 0,3°C. Para o protótipo Trombe esta diferença foi de 2,5 °C.

4.4.2 Dia mais frio do cenário 2

O cenário 2 foi executado de 28 de setembro a 19 de outubro de 2015. O dia 18 de outubro foi o dia mais frio no período com uma temperatura média de 17,3 °C. A temperatura externa mais baixa, de 16,1 °C, foi registrada às 21h do dia 18 de outubro.

4.4.2.1 Protótipo referência

A parede da fachada norte do protótipo referência, para o cenário 2, apresentou 7 períodos de comportamentos térmicos. No dia 17, da 1h às 7h, ocorreu um período de aquecimento, com a máxima diferença de temperaturas de 3 °C à 1h e a mínima de 1 °C às 7h. Das 8h às 14h ocorreu um período de armazenamento, com a diferença máxima de 6,5 °C às 12h e a mínima de 0,5 °C às 8h. Das 15h do dia 17 de outubro às 8h do dia 18 de outubro de 2015 ocorreu um aquecimento, em que a diferença máxima de temperatura foi de 4,9 °C às 19h e a mínima foi de 1,2 °C às 8h. Às 9h do dia 18 a diferença das temperaturas foi de 0 °C. Das 10h às 11h ocorreu um armazenamento com a diferença máxima de 1,4 °C às 11h e a mínima de 1,2 °C às 10h. Às 12h a diferença das temperaturas foi de 0 °C. Das 13h às 14h ocorreu um período de armazenamento, com a máxima diferença de 2,0 °C às 13h e a mínima de 1,4 °C às 14h. Das 15h do dia 18 de outubro às 7h do dia 19 houve um período de aquecimento com a máxima diferença de 2,8 °C às 19h e a mínima de 0,1 °C às 15h. Após esse período foram interrompidas as medições.

O protótipo referência para o dia mais frio do cenário 2 mostrou um comportamento térmico com grandes períodos de aquecimento para períodos curtos de armazenamento. Os períodos de armazenamento de calor concentraram-se do meio da manhã ao meio da tarde, mas o desejável era que o armazenamento fosse até o início da noite para somente então iniciar o aquecimento.

4.4.2.2 Protótipo Trombe

Para o cenário 2 os registros mostraram que no protótipo Trombe, da 1h do dia 18 de outubro à 1h do dia 19 de outubro, houve um período de armazenamento, com o registro de máxima diferença de temperaturas de 12,5°C às 14h e a mínima diferença de 0,1 °C à 1h do dia 18. Das 2h às 6h, no dia 18, ocorreu um período de aquecimento, em que a diferença máxima de temperaturas foi de 0,3 °C às 6h e a mínima foi de 0,1 °C às 2h. Das 7h do dia 18 até a 1h do dia 19 houve um armazenamento com a diferença máxima de temperaturas de 6,4 °C às 14h e a mínima de 0,1 °C à 1h. Às 2:00h do dia 19 não houve diferença entre as temperaturas. Das 3h às 6h houve um período de aquecimento com diferença máxima de 0,1 °C às 5h e mínima de praticamente 0 °C às 3h. Das 7h às 9h ocorreu um armazenamento em que a máxima diferença foi de 2 °C às 9h e a mínima foi de 0,8 °C às 7h. Após esse período foram interrompidas as medições.

Lembrando que, para o cenário 2, as aberturas de ventilação estavam fechadas nos 2 protótipos. A caixa de ar funcionou como uma estufa fechada. O comportamento térmico da parede Trombe nesse cenário apresentou períodos de armazenamento que se estenderam além do período diurno, adentrando em parte do noturno. Os períodos de aquecimento foram curtos e ocorreram nas últimas horas da madrugada. A sequência dos períodos registrados foi de 24 horas de armazenamento, 4 horas noturnas de aquecimento, 18 horas de armazenamento, 1 ponto de igualdade entre as temperaturas, 3 horas noturnas de aquecimento e 2 horas de armazenamento. Em seguida, as medições foram interrompidas para a coleta de dados. O comportamento térmico do protótipo Trombe nessa configuração para o aquecimento noturno mostrou-se eficiente. Foram os períodos diurnos longos de armazenamentos alternados como os períodos noturnos curtos de aquecimento os responsáveis por essa eficiência, conforme se verifica na Figura 113 a seguir. Observou-se, nos períodos noturnos, que as diferenças entre as temperaturas superficiais externas e internas da parede Trombe foram mantidas próximas de 0 °C entre 2h e 6h, que era o período do aquecimento, ocorrendo, no restante da noite, armazenamento pela parede de massa.

Figura 113 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas das paredes norte no dia mais frio do cenário 2 (°C).

Fonte: A autora, 2015.

4.4.2.3 Comparação entre os cenários 1 e 2 para os dias mais frios do protótipo Trombe

A temperatura média do ar no cenário 1 foi de 21 °C e do cenário 2, de 22,3 °C. A análise comparativa dos dias mais frios desses cenários do protótipo Trombe indicou que a configuração do cenário 2 apresentou uma eficiência térmica maior do que a configuração do cenário 1 para o aquecimento passivo noturno. Os períodos de armazenamento de energia foram mais longos no cenário 2 do que no 1, consequentemente, os de aquecimento foram mais curtos e ocorreram favoravelmente nas últimas horas da madrugada. A Figura 114 a seguir mostra um diagrama executado para auxiliar e concluir essas comparações.

Figura 114 – Diagramas comparativos das situações térmicas da parede Trombe para o cenário1 e o cenário 2 nos respectivos dias mais frios.

Fonte: A autora, 2015.

A defasagem de tempo entre a menor temperatura registrada externamente e as menores temperaturas superficiais internas foi de 11 horas nos dois protótipos. A diferença da menor temperatura superficial interna da parede norte do protótipo referência e a menor temperatura externa foi de 2,1 °C. Para o protótipo Trombe esta diferença atingiu 5,2 °C.

4.4.3 Dia mais quente: cenário 3

O cenário 3 foi montado para pesquisar condições de arrefecimento diurno. Ocorreu de 19 de outubro a 25 de novembro de 2015.

4.4.3.1 Protótipo referência

O comportamento térmico do protótipo referência configurou-se com seis períodos alternados de armazenamento e aquecimento. No dia 19 de outubro, das 11h às 17h, ocorreu um armazenamento com diferença máxima de temperaturas de 9 °C às 15:00h e mínima de 3,9 °C às 17h. Das 18h do dia 19

às 8h do dia 20 foi registrado um período de aquecimento com diferença mínima de 0,5 °C às 18h e máxima de 3 °C às 20h. No dia 20, das 9h às 18h, houve um período de armazenamento em que a mínima diferença foi de 0,5 °C às 9h e a máxima, de 9,5 °C às 15h. Das 19h do dia 20 às 8h do dia 21 o período foi de aquecimento com diferenças de temperaturas mínimas de 0,4 °C às 19h e máxima de 2,1 °C à 1h. Das 9h às 17h do dia 21 ocorreu um período de armazenamento com temperatura mínima de 0,7 °C às 9h e máxima de 7 °C às 15h. No dia 21 de outubro, das 18h às 23h, ocorreu um período de aquecimento com diferença mínima de temperaturas de 1,3 °C às 18h e máxima de 3,2 °C às 19h.

4.4.3.2 Protótipo Trombe

O comportamento térmico do protótipo Trombe configurou-se com quatro períodos alternados de armazenamento e aquecimento. Das 11h do dia 19 de outubro até as 5h do dia 20 de outubro ocorreu um período de armazenamento com mínimas diferenças de 4°C às 20h e máximas de 11,8 °C. Às 6h do dia 20 de outubro ocorreu um período de aquecimento com mínimas diferenças de 0,1 °C às 6h. Às 7h não houve diferenças entre as temperaturas. Das 8h do dia 20 até as 23h do dia 21 de outubro ocorreu um período de armazenamento em que as máximas diferenças foram de 11,5 °C às 16h e a mínima diferença foi de 0,3 °C às 8h.

4.4.3.3 Conclusões para o dia mais quente do cenário 3

O dia mais quente, 20 de outubro, registrou temperatura média de 26,7 °C e teve sua máxima às 14h. Neste horário a temperatura externa foi de 36,0 °C, a temperatura superficial interna da parede norte do protótipo referência foi de 29,0 °C e a temperatura superficial interna da parede norte do protótipo Trombe foi de 25,0 °C. A diferença de 4,0 °C a favor do protótipo Trombe em situação de arrefecimento sinaliza uma resposta favorável deste sistema passivo quanto a eficiência térmica.

O cenário 3 caracterizou-se por grandes períodos de armazenamento e poucos e curtos períodos de aquecimento (Figura 115). Foram registradas diferenças máximas de temperaturas elevadas e diferenças mínimas reduzidas. Do ponto de vista das temperaturas superficiais internas e externas das paredes norte, os dois protótipos apresentaram altas temperaturas, sugerindo, assim, um potencial para o arrefecimento, pois, segundo Gan (1997), para o arrefecimento de verão, a taxa de ventilação induzida aumenta com a temperatura da parede, com o ganho de calor solar.

Para a promoção do arrefecimento nesse sistema passivo há uma relação entre as temperaturas superficiais e o efeito chaminé, portanto, sugerindo pesquisas mais abrangentes.

Figura 115 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas das fachadas norte, do protótipo referência e do protótipo Trombe, e da temperatura do ar externa para o dia mais quente do cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho estudou experimentalmente o potencial de utilização de paredes Trombe para a cidade de São Paulo, avaliando comparativamente o desempenho térmico desse sistema passivo aplicado em um protótipo em relação a um protótipo sem essa tecnologia. O estudo considerou dois cenários para aquecimento noturno e um cenário para arrefecimento diurno por meio da parede Trombe ventilada.

Os experimentos indicaram um potencial de adoção desse sistema para a promoção do conforto térmico para os três cenários. Dentre os cenários de aquecimento, o cenário 2 apresentou resultados superiores ao cenário 1.

Este trabalho faz parte de um grupo de poucos estudos sobre esse tema no Brasil. A contribuição é pequena diante dos desdobros possíveis, pois há muito potencial de estudo para o tema, principalmente em relação ao arrefecimento. Dentre as sugestões de pesquisas futuras, propõe-se pesquisar:

- a estética como complemento integrante do sistema Trombe;
- a viabilidade de uma configuração padrão de utilização de sistema Trombe para o emprego dessa tecnologia em habitações de interesse social;
- o potencial de arrefecimento do sistema;
- novas orientações de insolação;
- potenciais de utilização de sombreamentos;
- técnicas construtivas que contribuam com a eficiência do sistema;
- relações volumétricas e configuração ideais do ambiente interior para potencializar a eficiência do sistema Trombe;
- a associação de sistemas ativos adequados para atuar com o sistema Trombe de maneira eficiente.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABBASSI, F.; DIMASSI, N.; DEHMANI, L. **Energetic study of a Trombe wall under different Tunisian building configuration**. Energy and Buildings, 80, p. 302-308, 2014.

AMATO, U.; COLUZZI, B.; CUOMO, V.; SERIO, C.; TROISE, G. **Effects of thermal control and passive solar elements on the dynamic behavior of a building**. Applied energy, 17, p. 263-282, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15220-3. Desempenho Térmico de Edificações – Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro**. Rio de Janeiro, 2005.

NBR 6492. Representação de projetos de arquitetura. Rio de Janeiro, 1994.

BOJIC, M.; JOHANNES, K.; KUZNIK, F. **Optimizing energy and environmental performance of passive Trombe wall**. Energy and Buildings, 70, p. 279-286, 2014.

BUZZONI, L.; DALL'OLLIO, R.; SPIGA, M. **Energy analysis of a passive solar system**. Rev. Gén. Therm., 37, p. 411-416, 1998.

CAVALCANTI, F.A.M.S. **Paredes Trombe no Brasil. Análise do potencial de utilização para aquecimento e refrigeração**. Tese (Doutorado em Arquitetura e Urbanismo). São Carlos, USP, 2013.

CHAN, H-Y.; RIFFAT, S.; ZHU, J. **Review of passive solar heating and cooling technologies**. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14, p. 781-789, 2010.

CHEL, A.; NAYAK, J. K.; KAUSHIK, G. **Energy conservation in honey storage buildings using Trombe wall**. Energy and Buildings, 40, p. 1.643-1.650, 2008.

CHEN, B.; CHEN, X.; DING, Y. H.; JIA, X. **Shading effects on the winter thermal performance of the Trombe wall air gap: an experimental study in Dalian**. Renewable Energy, 31, p. 1.961-1.971, 2006.

CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em busca de uma arquitetura sustentável para os trópicos**. Rio de Janeiro: Revan, 2003.

CORREA, C. B. **Arquitetura bioclimática. Adequação do projeto de arquitetura sustentável para os trópicos: conforto ambiental.** Portal Vitruvius, 04.07.2001.

CORTIZO, E.C. **Avaliação da técnica de termografia infravermelha para identificação de estruturas ocultas e diagnósticos de anomalias em edificações: ênfase em edificações do patrimônio histórico.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

FANG, X.; YANG, T. **Regression methodology for sensitivity analysis of solar heating walls.** Applied Thermal Engineering, 28, p.2.289-2.294, 2008.

FARES, A. **The effects of changing Trombe wall component on the thermal load.** Energy Procedia, 19, p. 47-54, 2012.

FERREIRA, J.; PINHEIRO, M. **In search of better energy performance in the Portuguese buildings – the case of a Portuguese regulation.** Energy Police, 39, p. 7.666-7.683, 2011.

FIGUEIRA, D.S.; KRENZINGER, A.; VIELMO, H.A. **Daily performance evaluation of a Trombe-Michel wall.** 17th International Congress of Mechanical Engineering, São Paulo, S.P., 2003.

_____ **Análise experimental e numérica do comportamento térmico de um coletor solar acumulador.** Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

FIORITO, F. **Trombe walls for lightweight buildings in temperature and hot climates. Exploring the use of phase-change materials for performances improvement.** Energy Procedia, 30, p. 1.110-1.119, 2012.

FROTA, A.B.; SCHIFFER, S.R. **Manual de conforto térmico.** São Paulo: Studio Nobel, 2012.

GAN, G. **A parametric study of Trombe walls for passive cooling of buildings.** Energy and Buildings, 27, p. 37-43, 1998.

GONÇALVES, J.C.S.; BODE, K. **Edifício ambiental.** São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

HAMI, K.; DRAOUI, B.; HAMI, O. **The thermal performances of a solar wall.** Energy, 39, p. 11-16, 2012.

HASSANAIN, A. A.; HOKAM, E. M.; MALLICK, T. K. **Effect of solar storage on the passive solar heating constructions.** Energy and Buildings, 43, p. 737-747, 2011.

JABER, S.; AJIB, S. **Optimum design of Trombe wall system in Mediterranean region.** Solar Energy, 85, p. 1.891-1.898, 2011.

KALOGIROU, S. A.; FLORIDES, G.; TASSOU, S. **Energy analysis of buildings employing thermal mass in Cyprus.** Renewable Energy, 27, p. 353-368, 2002.

KISILEWICZ, T. **Glazed building wall as a solar thermal collector.** Cracow University of Technology, ul. Warszawska, 24, 33-155 Kraków, Poland, 2009.

KOYUNBABA, B. K.; YILMAZ, Z. **The comparison of Trombe wall systems with single, double and PV panels.** Renewable Energy, 45, p. 111-118, 2012.

KRUGER, E.; SUZUKI, E.; MASATOSKI, A. **Evaluation of a Trombe wall system in a subtropical location.** Energy and Buildings, 66, p. 364-372, 2013.

LAI, C-M.; HOKOI, S. **Solar facades: a review.** Buildings and Environment, xxx, p. 1-14, 2015.

LAMBERTS, R.; GHISI, E.; PEREIRA, C.D.; BATISTA, J.O. **Casa Eficiente: Bioclimatologia e Desempenho Térmico.** v.1, Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

LAMNATOU, C.; MONDOL, J. D.; CHEMISANA, D.; MAURER, C. **Modelling and simulation of building-integrated solar thermal systems: behaviour of the system.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 45, p. 36-51, 2015.

_____; CHEMISANA, D.; MATEUS, R.; ALMEIDA, M. G.; SILVA, S. M. **Review and perspectives on Life Cycle Analysis of solar technologies with emphasis on building-integrated solar thermal systems.** Renewable Energy, 75, p. 833-846, 2015.

LANZINHA, J. C.; PAIVA, A. **Energy performance of Trombe walls: adaptation of ISO 13790:2008(E) to the Portuguese reality.** Energy and Buildings, 74, p. 111-119, 2014.

LEWANDOWSKI, W. M.; LEWANDOWSKA-IWANIAK, W. **The external walls of a passive building: a classification and description of their thermal and optical properties.** Energy and Buildings, 69, p. 93-102, 2014.

LIU, Y.; WANG, D.; MA, C.; LIU, J. **A numerical and experimental analysis of the air vent management and heat storage characteristics of a Trombe wall.** Solar Energy, 91, p. 1-10, 2013.

NWACHUKWU, N.; OKONKWO, W. I. **Effect of absorptive coating on solar energy storage in a Trombe wall system.** Energy and Buildings, 40, p. 371-374, 2008.

QUESADA, G.; ROUSSE, D.; DUTIL, Y.; BADACHE, M.; HALLÉ, S. **A comprehensive review of solar facades. Opaque solar facades.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, p. 2.820-2.932, 2012.

RUIZ-PARDO, A.; DOMÍNGUEZ, A.; FERNÁNDEZ, S. **Revision of Trombe wall calculation method proposed by UNE-EN ISO 13790.** Energy and Buildings, 42, p. 763-773, 2010.

RYAN, D.; BUREK, S. A. M. **Experimental study of influence of collector height on the steady state performance of a passive solar air heater.** Solar Energy, 84, p. 1.676-1.684, 2010.

SÁ, A. C. B. de **Parede de Trombe: análise experimental e simulação de desempenho térmico.** Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Covilhã, Universidade da Beira Interior, 2011.

SAADATIAN, O.; SOPIAN, K.; LIM, C. H.; ASSIM, N.; SULAIMAN, M. Y. **Trombe walls: a review of opportunities and challenges in research.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 16, p. 6.340-6.351, 2012.

SADINENI, S. B.; MADALA, S.; BOEHM, R. **Passive buildings energy savings: a review of building envelope components.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, p. 3.617-3.631, 2011.

SHEN, J.; LASSUE, S.; ZALEWSKI, L.; HUANG, D. **Numerical study on thermal behavior of classical or composite Trombe solar walls.** Energy and Buildings, 39, p. 962-974, 2007.

STAZI, F.; MASTRUCCI, A.; DI PERNA, C. **The behaviour of solar walls in residential buildings with different insulation levels: An experimental and numerical study.** Energy and Buildings, 47, p. 217-229, 2012.

_____; _____; _____ **Trombe wall management in summer conditions: an experimental study.** Solar Energy, 86, p. 2.839-2.851, 2012.

_____; _____; MUNAFÒ, P. **Life cycle assessment approach for the optimization of sustainable building envelopes: an application on solar wall systems.** Building and Environment, 58, p. 278-288, 2012.

STEPHAN, A.; CRAWFORD, R. B.; de MYTTENAERE, K. **A comprehensive assessment of the life cycle energy demand of passive houses.** Applied Energy, 112, p. 23-34, 2013.

STEVANOVIC, S. **Optimization of passive solar design strategies: a review.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 25, p. 177-196, 2013.

SUN, W.; JI, J.; LUO, C.; HE, W. **Performance of PV-Trombe wall in winter correlated with south façade design.** Applied Energy, 88, p. 224-231, 2011.

SUZUKI, E.V. **Avaliação do potencial de aquecimento/resfriamento de um sistema de climatização passiva.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Curitiba, Universidade Tecnológica do Paraná, 2012.

TASDEMIROGLU, E.; BERJANO, F.R.; TINAUT, D. **The performance results of Trombe-wall passive systems under Aegean Sea climatic conditions.** Solar Energy, vol. 30, n. 2, p. 181-189, 1983.

VETTORAZZI, E.; RUSSI, M.; SANTOS, J.C.P. dos **A utilização de estratégias passivas de conforto térmico e eficiência energética para o desenvolvimento de uma habitação unifamiliar.** Congresso Internacional de Sustentabilidade e Habitação de Interesse Social, Porto Alegre, 2010.

WEI, L.; DAN, L.; MIN, Z. **Effect analysis of a passive solar house in Tibet.** AASRI Procedia, 3, p. 619-623, 2012.

YEDDER, R.B.; BILGEN, E. **Natural convection and conduction in Trombe wall systems.** Int. J. Heat Mass Transfer, vol. 34, n. 4/5, p. 1.237-1.248, 1991.

YILMAZ, Z.; KUNDAKCI, A. B. **An approach for energy conscious renovation of residential buildings in Istanbul by Trombe wall system.** Building and Environment, 43, p. 508-517, 2008.

ZALEWSKI, L.; JOULIN, A.; LASSUE, S.; DUTIL, Y.; ROUSSE, D. E. **Experimental study of small-scale solar wall integrating phase change material.** Solar Energy, 86, p. 208-219, 2012.

_____; LASSUE, S.; DUTHOID, B.; BUTEZ, M. **Study of solar walls – validating a simulation model.** Building and Environment, 37, p. 109-121, 2002.

ZHAI, X. Q.; SONG, Z. P.; WANG, R. Z. **A review for the applications of solar chimneys in buildings.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15, p. 3.757-3.767, 2011.

ZHU, L.; HURT, R.; CORREA, D.; BOEHM, R. **Comprehensive energy and economic analyses on a zero energy house versus a conventional house.** Energy, 34, p. 1.043-1.053, 2009.

APÊNDICE A – Arquivo Fotográfico da Pesquisa

07/05/2015

Reconhecimento da área destinada à implantação dos protótipos e levantamento de medidas gerais necessárias.

Figura 116 - vista panorâmica parcial 1 do Anexo, FAU-USP, Cidade Universitária.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 117 - vista panorâmica parcial 2 do Anexo, FAU-USP, Cidade Universitária.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 118 - vista panorâmica parcial 3 do Anexo, FAU-USP, Cidade Universitária.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 119 - vista parcial 4 da área de implantação dos protótipos do Anexo, FAU-USP, Cidade Universitária.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 120 - Vista parcial 5 do Anexo, FAU-USP, Cidade Universitária.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 121 - Vista parcial 6 do Anexo, FAU-USP, Cidade Universitária.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 122 - Vista parcial 7 e, relação escala humana e dimensões da árvore 1.

Fonte: José Luiz Pedroso Cesso, 2015.

Figura 123 - Vista parcial 8 e, relação escala humana e dimensões da árvore 2.

Fonte: José Luiz Pedroso Cesso, 2015.

Figura 124- Vista parcial 9 do Anexo, FAU-USP, Cidade Universitária.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 125 - Vista parcial 10 do Anexo, FAU-USP, Cidade Universitária.

Fonte: A autora, 2015.

22/05/2015

A insolação, a orientação solar do local, obtida através do relógio de sol e da bússola e a implantação dos protótipos.

Figura 126 – Trajetória do sol no dia do estaqueamento dos protótipos.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 127 –Bússola e a linha de orientação Leste-Oeste.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 128 – Demarcação final da orientação Leste-Oeste.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 129 – Estaqueamento da base do protótipo referência e conferência do esquadro em relação a linha Leste-Oeste.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 130 – Estaqueamento da base do protótipo referência.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 131 – Estaqueamento da base do protótipo Trombe e conferência do esquadro.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 132 – Estaqueamento das bases dos protótipos demarcadas.

Fonte: A autora, 2015.

25/05/2015 - 1º dia de execução da obra dos protótipos: execução das bases.

Figura 133 – Registro das sombras da árvore 2 no início da manhã sobre a área estaqueada.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 134 – Preparação do solo para execução da base.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 135 – Limpeza do solo para execução da base.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 136 – Limpeza e nivelamento do solo para execução da base.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 137 – Limpeza do solo finalizada.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 138 – Demarcação das áreas das bases.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 139 – Bases executadas e sombras da árvore 2 sobre a área das bases.

Fonte: A autora, 2015.

27/05/2015 - 2º dia da execução da obra dos protótipos: execução das paredes.

Figura 140 – Demarcação das aberturas da parede norte do protótipo referência.

Autor: José Luiz Pedroso Cesso, 2015.

Figuras 141 e 142 – Conferência da localização das aberturas da parede norte do protótipo referência.

Autor: José Luiz Pedroso Cesso, 2015.

Figura 143 – Vista geral dos protótipos no 2º dia de execução da obra.

Fonte: A autora, 2015.

28/05/2015 - 3º dia da execução da obra dos protótipos: execução da amarração estrutural superior das paredes do protótipo referência e finalização das paredes.

Figuras 144 e 145 – Finalização da execução das paredes do protótipo referência.

Fonte: A autora, 2015.

Figuras 146 e 147 – Vista interna e externa, respectivamente, da parede norte do protótipo referência.

Fonte: A autora, 2015.

29/05/2015 - 4º dia da execução da obra dos protótipos: execução das paredes do protótipo Trombe.

Figura 148 – Vista geral do conjunto dos protótipos mostrando a execução das paredes do protótipo Trombe iniciadas e as paredes do protótipo referência executas.

Fonte: A autora, 2015.

Figuras 149 e 150 – Detalhe da parede norte com as aberturas no protótipo referência e da execução das paredes no protótipo Trombe, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015.

Figuras 151 e 152 – Detalhe da amarração estrutural vertical feita com ferro nos blocos vazados estruturais de concreto nos cantos dos protótipos.

Fonte: A autora, 2015.

1º/06/2015 - 5º dia da execução da obra dos protótipos: execução da laje no protótipo referência, da parede norte do protótipo Trombe com sua aberturas e, amarração das paredes do protótipo Trombe.

Figura 153 – Vista geral do conjunto dos protótipos mostrando a laje pré moldada do protótipo referência preparada para receber concreto e a amarração estrutural superior (cinta) do protótipo Trombe em execução.

Fonte: A autora, 2015.

Figuras 154 e 155 – Detalhes da laje pre-moldada para receber concreto e , da cinta de amarração do protótipo Trombe, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015.

Figuras 156 e 157 – Vista interna da parede norte com suas aberturas do protótipo Trombe sendo executada e, vista externa das paredes restantes finalizadas, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015.

Figuras 158 e 159 – Vistas externas das paredes do protótipo Trombe finalizadas.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 160 – Vista geral do conjunto dos protótipos no final do 5º dia de execução da obra.

Fonte: A autora, 2015.

2/06/2015 - 6º dia da execução da obra dos protótipos: execução da laje no protótipo Trombe e seu escoramento (aguardar secagem do concreto).

Figura 161 – Vista frontal paralela a parede sul do protótipo Trombe, do conjunto dos protótipos com as lajes finalizadas e escoradas.

Fonte: A autora, 2015.

Figuras 162 – Vista frontal paralela a parede sul do protótipo referência, do conjunto dos protótipos com as lajes finalizadas e escoradas.

Fonte: A autora, 2015.

Figuras 163 e 164 – Vistas internas das paredes norte e dos escoramentos das lajes do protótipo referência e do Trombe, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 165 – Vista final exterior geral do conjunto de protótipos no 6º dia de execução da obra.

Fonte: A autora, 2015.

11/06/2015 – Retirada das escoras, instalação das portas, pintura preta nos blocos externos da caixa de ar e instalação da caixa de ar – armação em ferro e vidros incolor, transparente, 6 mm.

Figuras 166 e 167 – Instalação das portas nos dois protótipos.

Fonte: José Luiz Pedroso Cesso, 2015.

Figuras 168 e 169 – Pintura externa da parede norte Trombe e instalação da caixa de ar.

Fonte: José Luiz Pedroso Cesso, 2015.

25/06/2015 – Abertura dos protótipos e constatação de infiltração de água pelas coberturas.

Figuras 170 e 171– Vistas internas das paredes norte dos protótipos, aparelhos de medição e marcas das infiltrações d'água sinalizadas pelas setas vermelhas.

Fonte: A autora, 2015.

29/06/2015 – Execução de isolamento e proteção das coberturas com placas de isopor de 50 mm e lona pástica, fechamento das aberturas de ventilação do protótipo referência e das aberturas das fechaduras dos dois protótipos.

Figuras 172 – Preparação das placas de isopor a serem utilizadas nas coberturas dos protótipos no LAME.

Fonte: A autora, 2015.

Figuras 173 e 174 – Vista superior da laje concretada e, da mesma laje, com as placas de isopor posicionadas, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015.

Figuras 175 e 176 – Recobrimento das placas de isopor com lona plástica branca e, beirada virada da lona fixadas em ripas de madeira, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015.

Figuras 177 e 177 – Fixação das beiradas da lona plástica, vista superior e detalhe da fixação, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015.

Figuras 178 e 179 – Protótipos com proteção e isolamento da cobertura finalizados, protótipo referência a esquerda com aberturas de ventilação fechadas e, sensores instalados para medição de temperaturas superficiais nas paredes norte.

Fonte: A autora, 2015.

Figuras 180 e 181 – Detalhe do fechamento da abertura na parede norte no protótipo referência e do fechamento dos vãos das fechaduras nas portas, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015.

27/08//2015 – Confecção das adaptações necessárias nas portas para execução das medições nos 3 cenários que compõe a etapa III. Execução de abertura inferior na porta, para ventilação cruzada, instalação de tela e, abertura para execução das imagens termo visoras.

Figuras 182 e 183 – Marcação das aberturas a serem efetuadas e execução das aberturas nas portas, respectivamente.

Fonte: José Luiz Pedroso Cesso, 2015.

Figuras 184 e 185 – Furação efetuada e instalação de tela para proteção contra animais, respectivamente.

Fonte: José Luiz Pedroso Cesso, 2015.

Figura 186 – Porta recolocada com aberturas executadas e fechadas com tampas removíveis.

Fonte: José Luiz Pedroso Cesso, 2015.

28/09/2015 – Preparo do protótipo Trombe para 2º cenário da etapa III de medições. Fechamento das aberturas de ventilação.

Figuras 187 e 188 – Detalhes das aberturas inferiores de ventilação da protótipo Trombe antes e após fechamento, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015.

Figuras 189 e 190 – Detalhe das aberturas superiores de ventilação da protótipo Trombe fechadas e das inferiores, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015.

19/10/2015 – Preparação dos protótipos para o 3º cenário da etapa III de medições.

Retirada dos tampões de fechamento das aberturas de ventilação inferiores do protótipo Trombe e, retirada do vidro e instalação de tela de proteção de animais na abertura superior da caixa de ar. Retirada dos tampões, instalação de tela e de aba de proteção das chuvas no protótipo referência. Retirada dos tampões das portas e instalação de aba de proteção das chuvas nos protótipos.

Figuras 191 e 192 – Detalhe das aberturas inferiores de ventilação do protótipo Trombe abertas e vista externa da abertura superior do vidro aberta com tela de proteção, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015.

Figuras 193 e 194 – Detalhe da abertura superior da ventilação do vidro do protótipo Trombe aberta e telada e vista geral externa da parede norte com a abertura superior aberta e a inferior fechada, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015.

Figuras 195 e 196 – Detalhe da abertura superior da ventilação do vidro do protótipo Trombe, aberta e telada, e vista geral externa da parede norte com a abertura superior aberta e a inferior fechada, respectivamente.

Fonte: A autora, 2015.

Figuras 197 e 198 – Detalhe da abertura inferior aberta na porta, telada e com proteção para as chuvas, e do detalhe de proteção das chuvas nas aberturas superiores da parede norte do protótipo referência.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 199 – Vista geral das fachadas leste e sul dos protótipos finalizados para a etapa III de medições.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 200 – Vista geral das fachadas norte dos protótipos finalizados para a etapa III de medições.

Fonte: A autora, 2015.

APÊNDICE B – Gráficos das Medições nos Protótipos

1 Etapa I (30/06/2015 - 29/07/2015)

1.1 Protótipo Referência I

1.1.1 Aberturas superior e inferior I

1.1.1.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 201 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas inferior e superior do protótipo referência na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 202 – Gráfico das diferenças das temperaturas de ar das aberturas superior e inferior do protótipo referência na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

1.1.1.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 203 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas inferior e superior do protótipo referência na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 204– Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo referência na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

1.1.2 Cobertura I

1.1.2.1 Temperaturas superficiais internas e externas (°C)

Figura 205 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da cobertura do protótipo referência na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 206 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas da cobertura do protótipo referência na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

1.1.3 Parede I

1.1.3.1 Temperaturas superficiais internas e externas (°C)

ERRO NA LEITURA DA MEDIÇÃO (sensor descolou da superfície).

1.2 Protótipos Referência - Trombe I

1.2.1 Aberturas Inferiores I

1.2.1.1 Temperaturas do ar (°C)

Figura 207 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas inferiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 208 – Gráfico das diferenças de temperaturas do ar nas aberturas inferiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

1.2.1.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 209 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas inferiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 210 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas inferiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

1.2.2 Aberturas superiores I

1.2.2.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 211 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas superiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 212 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas superiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

1.2.2.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 213 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas superiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 214 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas superiores dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

1.2.3 Coberturas I

1.2.3.1 Temperatura superficial interna (°C)

Figura 215 – Gráfico das temperaturas superficiais internas das coberturas dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição I.

Fonte: a autora, 2015.

Figura 216 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais internas das coberturas dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

1.2.3.2 Temperatura superficial externa (°C)

Figura 217 – Gráfico das temperaturas superficiais externas das coberturas dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 218 – Gráfico das diferenças de temperaturas superficiais externas das coberturas dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

1.2.4 Paredes Norte I

1.2.4.1 Temperatura superficial interna (°C)

Figura 219 – Gráfico das temperaturas superficiais internas das paredes norte dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 220 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais internas das paredes norte dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

1.2.4.2 Temperatura superficial externa (°C)

Não há gráfico - sem medição (sensor descolou da superfície).

1.2.5 Tripés

1.2.5.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 221 – Gráfico das temperaturas do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 222 – Gráfico das diferenças de temperaturas do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição I.

Fonte: a autora, 2015.

1.2.5.2 Temperatura de globo (°C)

Figura 223 – Gráfico das temperaturas de globo nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 224 – Gráfico das diferenças das temperaturas de globo nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

1.2.5.3 Umidade relativa do ar (%)

Figura 225 – Gráfico das umidades relativas do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 226 – Gráfico das diferenças das umidades relativas do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

1.2.5.4 Velocidade do ar (m/s)

Figura 227 – Gráfico das velocidades do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 228 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

1.3 Protótipo Trombe I

1.3.1 Aberturas superior e inferior I

1.3.1.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 229 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas inferior e superior do protótipo Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 230 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

1.3.1.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 231 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas inferior e superior do protótipo Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 232 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

1.3.2 Cobertura I

1.3.2.1 Temperatura superficial interna e externa (°C)

Figura 233 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da cobertura do protótipo Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 234 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas do protótipo Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

1.3.3 Parede Norte I

1.3.3.1 Temperatura superficial interna e externa (°C)

Figura 235 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da parede norte do protótipo Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 236 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas da parede norte do protótipo Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

1.3.4 Vidro I

1.3.4.1 Temperatura superficial interna e externa (°C)

Figura 237 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas do vidro do protótipo Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 238 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas do vidro do protótipo Trombe na etapa de medição I.

Fonte: A autora, 2015.

2. Etapa II (31/07/2015 a 27/08/2015)

2.1 Protótipo Referência II

2.1.1 Abertura superior e inferior II

2.1.1.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 239 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo referência na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 240 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo referência na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.1.1.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 241 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo referência na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 242 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo referência na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.1.2 Cobertura II

2.1.2.1 Temperatura superficial externa e interna (°C)

Figura 243 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da cobertura do protótipo referência na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 244 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas da cobertura do protótipo referência na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.1.3 Parede Norte II

2.1.3.1 Temperatura superficial externa e interna (°C)

Figura 245 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da parede norte do protótipo referência na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 246 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas da parede norte do protótipo referência na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.2 Protótipo Referência e Trombe II

2.2.1 Aberturas Inferiores II

2.2.1.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 247 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas inferiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 248 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas inferiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.2.1.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 249 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas inferiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 250 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas inferiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.2.2 Aberturas Superiores II

2.2.2.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 251 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas superiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 252 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas superiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.2.2.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 253 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas superiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 254 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas superiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.2.3 Coberturas II

2.2.3.1 Temperatura superficial interna (°C)

Figura 255 – Gráfico das temperaturas superficiais internas das coberturas nos protótipos referência e Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 256 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais internas das coberturas nos protótipos Trombe e referência na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.2.3.2 Temperatura superficial externa (°C)

Figura 257 – Gráfico das temperaturas superficiais externas das coberturas dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 258 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas das coberturas dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.2.4 Paredes Norte II

2.2.4.1 Temperatura superficial interna (°C)

Figura 259 – Gráfico das temperaturas superficiais internas das paredes norte dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 260 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais internas das paredes norte dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.2.4.2 Temperatura superficial externa (°C)

Figura 261 – Gráfico das temperaturas superficiais externas das paredes norte dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 262 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas das paredes norte dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.2.5 Tripés II

2.2.5.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 263 – Gráfico das temperaturas do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 264 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nos tripés dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.2.5.2 Temperatura de globo (°C)

Figura 265 – Gráfico das temperaturas de globo nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 266 – Gráfico das diferenças das temperaturas de globo nos tripés dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.2.5.3 Umidade relativa do ar (%)

Figura 267 – Gráfico das umidades relativas do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 268 – Gráfico das diferenças das umidades relativas do ar nos tripés dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.2.5.4 Velocidade do ar (m/s)

Figura 269 – Gráfico das velocidades do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 270 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nos tripés dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.3 Protótipo Trombe II

2.3.1 Aberturas superiores e inferiores II

2.3.1.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 271 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas inferiores e superiores do protótipo Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 272 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.3.1.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 273 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas inferior e superior do protótipo Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 274 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.3.2 Cobertura II

2.3.2.1 Temperatura superficial externa e interna (°C)

Figura 275 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da cobertura do protótipo Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 276 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas da cobertura do protótipo Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.3.3 Parede Norte II

2.3.3.1 Temperatura superficial externa e interna (°C)

Figura 277 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da parede norte do protótipo Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 278 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas da parede norte do protótipo Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

2.3.4 Vidro II

2.3.4.1 1 Temperatura superficial externa e interna (°C)

Figura 279 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas do vidro do protótipo Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 280 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas do vidro do protótipo Trombe na etapa de medição II.

Fonte: A autora, 2015.

3. ETAPA III – cenário 1 (31/08/2015 - 28/09/2015) – Aquecimento

3.1 Protótipo Referência III cen1 – aquecimento

3.1.1 Aberturas superior e inferior III cen1 – aquecimento

3.1.1.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 281 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas inferior e superior do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 282 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.1.1.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 283 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas inferior e superior do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 284 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.1.2 Cobertura III cen1 – aquecimento

3.1.2.1 Temperatura superficial interna e externa (°C)

Figura 285 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da cobertura do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 286 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas da cobertura do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.1.3 Parede Norte III cen1 – aquecimento

3.1.3.1 Temperatura superficial interna e externa (°C)

Figura 287 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da parede norte do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 288 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas da parede norte do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.2 Protótipos Referência e Trombe III cen1 – aquecimento

3.2.1 Aberturas Inferiores III cen1 – aquecimento

3.2.1.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 289 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas inferiores dos protótipos referência e Trombe etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 290 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas inferiores dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.2.1.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 291 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas inferiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 292 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas inferiores dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.2.2 Aberturas Superiores III cen1 – aquecimento

3.2.2.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 293 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas superiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 294 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas superiores dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.2.2.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 295 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas superiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 296 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas superiores dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.2.3 Coberturas III cen1 – aquecimento

3.2.3.1 Temperatura superficial interna (°C)

Figura 297 – Gráfico das temperaturas superficiais internas das coberturas dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 298 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais internas das coberturas dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.2.3.2 Temperatura superficial externa (°C)

Figura 299 – Gráfico das temperaturas superficiais externas das coberturas dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 300 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas das coberturas dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.2.4 Paredes Norte III cen1 – aquecimento

3.2.4.1 Temperatura superficial interna (°C)

Figura 301 – Gráfico das temperaturas superficiais internas das paredes norte dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 302 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais internas das paredes norte dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.2.4.2 Temperatura superficial externa (°C)

Figura 303 – Gráfico das temperaturas superficiais externas das paredes norte dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 304 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas das paredes norte dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.2.5 Tripés III cen1 – aquecimento

3.2.5.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 305 – Gráfico das temperaturas do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 306 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nos tripés dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.2.5.2 Temperatura de globo (°C)

Figura 307 – Gráfico das temperaturas dos globos nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 308 – Gráfico das diferenças das temperaturas de globos nos tripés dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.2.5.3 Umidade relativa do ar (%)

Figura 309 – Gráfico das umidades relativas do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 310 – Gráfico das diferenças das umidades relativas do ar nos tripés dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.2.5.4 Velocidade do ar (m/s)

Figura 311 – Gráfico das velocidades do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 312 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nos tripés dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.3 Protótipo Trombe III cen1 – aquecimento

3.3.1 Aberturas superiores e inferiores III cen1

3.3.1.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 313 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas inferior e superior do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 314 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.3.1.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 315 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas inferior e superior do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 316 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.3.2 Cobertura III cen1 – aquecimento

3.3.2.1 Temperatura superficial interna e externa (°C)

Figura 317 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da cobertura do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 318 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas da cobertura do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.3.3 Parede Norte III cen1 – aquecimento

3.3.3.1 Temperatura superficial interna e externa (°C)

Figura 319 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da parede norte do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 320 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais internas e externas da parede norte do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

3.3.4 Vidro III cen1 – aquecimento

3.3.4.1 Temperatura superficial interna e externa (°C)

Figura 321 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas do vidro do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 322 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas do vidro do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 1.

Fonte: A autora, 2015.

4 ETAPA III – cenário 2 (28/09/2015 - 19/10/2015) – Aquecimento

4.1 Protótipo Referência III cen2 – aquecimento

4.1.1 Aberturas inferior e superior III cen2 – aquecimento

4.1.1.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 323 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas inferior e superior do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 324 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.1.1.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 325 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas inferior e superior do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 326 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.1.2 Cobertura III cen2 – aquecimento

4.1.2.1 Temperatura superficial interna e externa (°C)

Figura 327 - Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da cobertura do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 328 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas da cobertura do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.1.3 Parede Norte III cen2 – aquecimento

4.1.3.1 Temperatura superficial interna e externa (°C)

Figura 329 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da parede norte do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 330 – Gráfico das temperaturas superficiais externas e internas da parede norte no protótipo referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.2 Protótipos Referência e Trombe III cen2 – aquecimento

4.2.1 Aberturas Inferiores III cen2 – aquecimento

4.2.1.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 331 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas inferiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 332 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas inferiores dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.2.1.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 333 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas inferiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 334 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas inferiores dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.2.2 Aberturas Superiores III cen2 – aquecimento

4.2.2.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 335 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas superiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 336 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas superiores dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.2.2.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 337 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas superiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 338 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas superiores dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.2.3 Coberturas III cen2 – aquecimento

4.2.3.1 Temperatura superficial interna (°C)

Figura 339 – Gráfico das temperaturas superficiais internas das coberturas dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 340 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais internas das coberturas dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.2.3.2 Temperatura superficial externa (°C)

Figura 341 – Gráfico das temperaturas superficiais externas das coberturas dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 342 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas das coberturas dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.2.4 Paredes Norte III cen2 – aquecimento

4.2.4.1 Temperatura superficial interna (°C)

Figura 343 – Gráfico das temperaturas superficiais internas das paredes norte dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 344 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais internas das paredes norte dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.2.4.2 Temperatura superficial externa (°C)

Figura 345 – Gráfico das temperaturas superficiais externas das paredes norte dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 346 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas das paredes norte dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.2.5 Tripés III cen2 – aquecimento

4.2.5.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 347 – Gráfico das temperaturas do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 348 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nos tripés dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.2.5.2 Temperatura de globo (°C)

Figura 349 – Gráfico das temperaturas de globo nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 350 – Gráfico das diferenças das temperaturas de globo nos tripés dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.2.5.3 Umidade relativa do ar (%)

Figura 351 – Gráfico das umidades relativas do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 352 – Gráfico das diferenças das umidades relativas do ar nos tripés dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.2.5.4 Velocidade do ar (m/s)

Figura 353 – Gráfico das velocidades do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 354 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nos tripés dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.3 Protótipo Trombe III cen2 – aquecimento

4.3.1 Aberturas inferiores e superiores III cen1

4.3.1.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 355 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas inferior e superior do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 356 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.3.1.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 357 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas inferior e superior do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 358 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.3.2 Coberturas III cen2 – aquecimento

4.3.2.1 Temperatura superficial interna e externa (°C)

Figura 359 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da cobertura do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 360 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.3.3 Parede Norte III cen2 – aquecimento

4.3.3.1 Temperatura superficial interna e externa (°C)

Figura 361 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da parede norte do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 362 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas da parede norte do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

4.3.4 Vidro III cen2 – aquecimento

4.3.4.1 Temperatura superficial interna e externa (°C)

Figura 363 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas do vidro do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 364 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas do vidro do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 2.

Fonte: A autora, 2015.

5 Etapa III – cenário 3 (19/10/2015 a 25/11/2015) – Arrefecimento

5.1 Protótipo Referência III cen3 – arrefecimento (2 aberturas superiores da parede norte e abertura da porta abertas)

5.1.1 Aberturas inferior e superior III cen3 – aquecimento

5.1.1.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 365 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas inferior e superior do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 366 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

5.1.1.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 367 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas inferior e superior do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 368 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

5.1.2 Cobertura III cen3 – arrefecimento

5.1.2.1 Temperatura superficial interna e externa (°C)

Figura 369 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da cobertura do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 370 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas da cobertura do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

5.1.3 Parede Norte III cen3 – arrefecimento

5.1.3.1 Temperatura superficial interna e externa (°C)

Figura 371 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da parede norte do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 372 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas da parede norte do protótipo referência na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

5.2 Protótipo Referência e Trombe III cen3 – Arrefecimento

5.2.1 Aberturas Inferiores III cen3 – arrefecimento

5.2.1.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 373 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas inferiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 374 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas inferiores dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

5.2.1.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 375 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas inferiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 376 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas inferiores dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

5.2.2 Aberturas Superiores III cen3 – arrefecimento

5.2.2.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 377 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas superiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 378 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas superiores dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

5.2.2.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 379 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas superiores dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 380 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas superiores dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

5.2.3 Coberturas III cen3 - arrefecimento

5.2.3.1 Temperaturas superficiais internas (°C)

PROBLEMAS COM OS DADOS – DEFASAGEM COM DUPLICIDADE DE MEDIDAS.

5.2.3.2 Temperaturas superficiais externas (°C)

PROBLEMAS COM OS DADOS – DEFASAGEM COM DUPLICIDADE DE MEDIDAS.

5.2.4 Paredes III cen3 – arrefecimento

5.2.4.1 Temperatura superficial interna (°C)

Figura 381 – Gráfico das temperaturas superficiais internas das paredes norte dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 382 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais internas das paredes norte dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

5.2.4.2 Temperatura superficial externa (°C)

Figura 383 – Gráfico das temperaturas superficiais externas das paredes norte dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 384 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas das paredes norte dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

5.2.5 Tripés III cen3 – arrefecimento

5.2.5.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 385 – Gráfico das temperaturas do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 386 – Gráfico das temperaturas do ar nos tripés dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

5.2.5.2 Temperatura de globo (°C)

Figura 387 – Gráfico das temperaturas de globo nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 388 – Gráfico das diferenças das temperaturas de globo nos tripés dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

5.2.5.3 Umidade relativa do ar (%)

Figura 389 – Gráfico das umidades relativas do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 390 – Gráfico das diferenças das umidades relativas do ar nos tripés dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

5.2.5.4 Velocidade do ar (m/s)

Figura 391 – Gráfico das velocidades do ar nos tripés dos protótipos referência e Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 392 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nos tripés dos protótipos Trombe e referência na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

5.3 Protótipo Trombe III cen3 – arrefecimento

5.3.1 Aberturas inferior e superior III cen3

5.3.1.1 Temperatura do ar (°C)

Figura 393 – Gráfico das temperaturas do ar nas aberturas inferior e superior do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 394 – Gráfico das diferenças das temperaturas do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

5.3.1.2 Velocidade do ar (m/s)

Figura 395 – Gráfico das velocidades do ar nas aberturas inferior e superior do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 396 – Gráfico das diferenças das velocidades do ar nas aberturas superior e inferior do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

5.3.2 Coberturas III cen3 – arrefecimento

5.3.2.1 Temperatura superficial interna e externa (°C)

Figura 397 – Gráfico das temperaturas internas e externas da cobertura do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 398 – Gráfico das diferenças das temperaturas externas e internas da cobertura do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

5.3.3 Parede Norte III cen3 – arrefecimento

5.3.3.1 Temperatura superficial externa e interna (°C)

Figura 399 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas da parede norte do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 400 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas da parede norte do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

5.3.4 Vidro III cen3 – arrefecimento

5.3.4.1 Temperatura superficial externa e interna (°C)

Figura 401 – Gráfico das temperaturas superficiais internas e externas do vidro do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 402 – Gráfico das diferenças das temperaturas superficiais externas e internas do vidro do protótipo Trombe na etapa de medição III, cenário 3.

Fonte: A autora, 2015.

6. Etapa I – Coberturas e fachadas norte - antes e após o isolamento da cobertura

6.1 Protótipo referência

Figura 403 – Gráfico das temperaturas superficiais externas e internas da cobertura do protótipo referência na etapa de medição I antes do isolamento da cobertura (°C).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 404 – Gráfico das temperaturas superficiais externas e internas da cobertura do protótipo referência na transição do isolamento da cobertura (°C).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 405 – Gráfico das temperaturas superficiais externas e internas da fachada norte do protótipo referência na transição do isolamento da cobertura (°C).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 406 – Gráfico das temperaturas superficiais externas e internas da cobertura do protótipo referência no período de 23/06/2015 a 28/07/2015 (°C).

Fonte: A autora, 2015.

6.2 Protótipo Trombe

Figura 407 – Gráfico das temperaturas superficiais externas e internas da cobertura do protótipo Trombe na etapa de medição I antes do isolamento da cobertura (°C).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 408 – Gráfico das temperaturas superficiais externas e internas da cobertura do protótipo Trombe na transição do isolamento da cobertura (°C).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 409 – Gráfico das temperaturas superficiais externas e internas da parede fachada norte do protótipo Trombe na transição do isolamento da cobertura (°C).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 410 – Gráfico das temperaturas superficiais externas e internas da cobertura do protótipo Trombe no período de 23/06/2015 a 28/07/2015 (°C).

Fonte: A autora, 2015.

7 Etapa III, cenários 1,2 e 3 – gráficos comparativos das medições com os dados do IEE

7.1 Cenário 1 – Dia mais frio: 12/09/2015 (gráfico de 11/09/2015 a 13/09/2015)

Figura 411 – Gráfico das temperaturas superficiais externas e internas das paredes norte dos protótipos referência e Trombe e da temperatura do ar externa no cenário 1, dia mais frio (°C).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 414 – Gráfico das temperaturas dos globos dos dois protótipos e a temperatura do ar externa no cenário 1, dia mais quente (°C).

Fonte: A autora, 2015.

7.3 Cenário 2 – Dia mais frio: 18/10/2015 (gráfico de 17/10/2015 a 19/10/2015)

Figura 415 – Gráfico das temperaturas superficiais externas e internas das paredes norte dos protótipos referência e Trombe e da temperatura do ar externa no cenário 2, dia mais frio (°C).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 416 – Gráfico das temperaturas dos globos dos dois protótipos e a temperatura do ar externa no cenário 2, dia mais frio ($^{\circ}\text{C}$).

Fonte: A autora, 2015.

7.4 Cenário 2 – Dia mais quente: 15/10/2015 (gráfico de 14/10/2015 a 16/10/2015)

Figura 417 – Gráfico das temperaturas superficiais externas e internas das paredes norte dos protótipos referência e Trombe e da temperatura do ar externa no cenário 2, dia mais quente ($^{\circ}\text{C}$).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 418 – Gráfico das temperaturas dos globos dos dois protótipos e a temperatura do ar externa no cenário 2, dia mais quente (°C).

Fonte: A autora, 2015.

7.5 Cenário 3 – Dia mais frio: 25/10/2015 (gráfico de 24/10/2015 a 26/10/2015)

Figura 419 – Gráfico das temperaturas superficiais externas e internas das paredes norte dos protótipos referência e Trombe e da temperatura do ar externa no cenário 3, dia mais frio (°C).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 420 – Gráfico das temperaturas dos globos dos dois protótipos e a temperatura do ar externa no cenário 3, dia mais frio (°C).

Fonte: a autora, 2015.

7.6 Cenário 3 – Dia mais quente: 20/10/2015 (gráfico de 19/10/2015 a 21/10/2015)

Figura 421 – Gráfico das temperaturas superficiais externas e internas das paredes norte dos protótipos referência e Trombe e da temperatura do ar externa no cenário 3, dia mais quente (°C).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 422 – Gráfico das temperaturas dos globos dos dois protótipos e a temperatura do ar externa no cenário 3, dia mais quente (°C).

Fonte: A autora, 2015.

APÊNDICE C – Fotos elaboradas com câmera termovisora FLIR

1 Etapa III – cen 1: fotos realizadas de hora em hora das 18:00h do dia 24 de setembro de 2015 as 6:00h do dia 25 de setembro de 2015

1.2 Fotos Externas

Figura 423 – Foto externa termovisora da fachada norte do protótipo referência as 18:00h de 24/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 424 – Foto externa termovisora da fachada norte do protótipo Trombe as 18:00h de 24/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 425 – Foto externa termovisora da fachada norte do protótipo referência as 6:00h de 25/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 426 – Foto externa termovisora da fachada norte do protótipo Trombe as 6:00h de 25/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Fotos Internas

Figura 427 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 18:00h de 24/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 428 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 18:00h de 24/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 429 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 19:00h de 24/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 430 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 19:00h de 24/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 431 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 20:00h de 24/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 432 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 20:00h de 24/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 433 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 21:00h de 24/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 434 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 21:00h de 24/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 435 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 22:00h de 24/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 436 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 22:00h de 24/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 437 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 23:00h de 24/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 438 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 23:00h de 24/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 439 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 24:00h de 24/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 440 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 24:00h de 24/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 441 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 1:00h de 25/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 442 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 1:00h de 25/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 443 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 2:00h de 25/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 444 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 2:00h de 25/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 445 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 3:00h de 25/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 446 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 3:00h de 25/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 447 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 4:00h de 25/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 448 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 4:00h de 25/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 449 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 5:00h de 25/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 450 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 5:00h de 25/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 451 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 6:00h de 25/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 452 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 6:00h de 25/09/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Etapa III – cen 2: fotos realizadas de hora em hora das 18:00h do dia 08 de outubro de 2015 as 6:00h do dia 09 de outubro de 2015

Fotos Externas

Figura 453 – Foto externa termovisora da fachada norte do protótipo referência as 18:00h do dia 08/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 454 – Foto externa termovisora da fachada norte do protótipo Trombe as 18:00h de 08/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 455 – Foto externa termovisora da fachada norte-oeste do protótipo referência as 18:00h de 08/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 456 – Foto externa termovisora da fachada norte-oeste do protótipo Trombe as 18:00h de 08/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 457 – Foto externa termovisora da fachada norte do protótipo referência as 6:00h de 09/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 458 – Foto externa termovisora da fachada norte do protótipo Trombe as 6:00h de 09/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Fotos Internas

Figura 459 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 18:00h de 08/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 460 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 18:00h de 08/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 461 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 19:00h de 08/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 462 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 19:00h de 08/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 463 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 20:00h de 08/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 464 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 20:00h de 08/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 465 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 21:00h de 08/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 466 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 21:00h de 08/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 467 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 22:00h de 08/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 468 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 22:00h de 08/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 469 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 23:00h de 08/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 470 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 23:00h de 08/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 471 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 24:00h de 08/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 472 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 24:00h de 08/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 473 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 1:00h de 09/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 474 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 1:00h de 09/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 475 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 2:00h de 09/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 476 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 2:00h de 09/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 477 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 3:00h de 09/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 478 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 3:00h de 09/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 479 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 4:00h de 09/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 480 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 4:00h de 09/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 481 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 5:00h de 09/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 482 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 5:00h de 09/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 483 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 6:00h de 09/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 484 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 6:00h de 09/10/2015.

Fonte: A autora, 2015.

Etapa III – cen 3: fotos realizadas de hora em hora das 6:00h as 19:00h do dia 23 de novembro de 2015. (horário de verão desde 18 de outubro)

Fotos Externas

Figura 485 – Foto externa termovisora da fachada norte do protótipo referência as 6:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 486 – Foto externa termovisora da fachada norte do protótipo Trombe as 6:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Fotos Internas

Figura 487 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 6:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 488 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 6:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 489 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 7:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 490 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 7:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 491 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 8:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 492 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 8:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 493 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 9:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 494 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 9:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 495 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 10:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 496 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 10:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 497 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 1100h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 498 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 11:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 499 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 12:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 500 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 12:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: a autora, 2015.

Figura 501 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 13:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 502 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 13:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 503 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 14:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 504 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 14:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 505 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 15:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 506 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 15:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 507 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 16:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 508 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 16:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 509 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 17:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 510 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 17:00h de 23/11/2015 (HV).Fonte: a autora, 2015.

Fonte: A autora, 2015.

Figura 511 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 18:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 512 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 18:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 513 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo referência as 19:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

Figura 514 – Foto termovisora interna da fachada norte do protótipo Trombe as 19:00h de 23/11/2015 (HV).

Fonte: A autora, 2015.

ANEXO A – Especificações dos Instrumentos de Medição

1 Instrumentos do Laboratório de Tecnologia da Faculdade de Arquitetura e Urbanismo da USP (LABAUT)

Especificações técnicas foram fornecidas pelo LABAUT.

1.1 Data Logger, HOBO U12-013, ONSET Corporation

Figura 515 – Especificações técnicas do Data Logger HOBO U12-013.

Specifications	
Measurement range	Temperature: -20° to 70°C (-4° to 158°F) RH: 5% to 95% RH External input channels (see sensor manual): 0 to 2.5 VDC; 0 to 5 VDC (with CABLE-ADAP5) and 0 to 10 VDC (with CABLE-ADAP10)
Accuracy	Temperature: $\pm 0.35^{\circ}\text{C}$ from 0° to 50°C ($\pm 0.63^{\circ}\text{F}$ from 32° to 122°F), see Plot A RH: $\pm 2.5\%$ from 10% to 90% RH (typical), to a maximum of $\pm 3.5\%$. See Plot B. External input channels (see sensor manual): $\pm 2\text{ mV} \pm 2.5\%$ of absolute reading
Resolution	Temperature: 0.03°C at 25°C (0.05°F at 77°F), see Plot A RH: 0.03% RH External Input Channels: 0.6 mV
Drift	Temperature: 0.1°C/year (0.2°F/year) RH: <1% per year typical; RH hysteresis 1%
Response time in airflow of 1 m/s (2.2 mph)	Temperature: 6 minutes, typical to 90% RH: 1 minute, typical to 90%
Time accuracy	± 1 minute per month at 25°C (77°F), see Plot C
Operating temperature	Logging: -20° to 70°C (-4° to 158°F) Launch/readout: 0° to 50°C (32° to 122°F), per USB specification
Battery life	1 year typical use
Memory	64K bytes (43,000 12-bit measurements)
Weight	46 g (1.6 oz)
Dimensions	58 x 74 x 22 mm (2.3 x 2.9 x 0.9 inches)
The CE Marking identifies this product as complying with all relevant directives in the European Union (EU).

Fonte: LABAUT, 2016.

1.2 HOBOWARE Pro Growing Degree Days Assistant User's Guide, ONSET Corporation

Figura 516 – Guia do usuário do HOBOWare Pro GrowingDegreeDaysAssistant, folha 1.

4. Select the Calculation Method you want to use.
 - **Average Method:** Calculates the average of the high and low temperatures for the day (adjusted to the lower and upper thresholds, if necessary), then subtracts the low threshold to compute the GDD.
 - **Single Triangle (no Cutoff):** Uses the low and high daily temperatures to compute a set of two linear equations to generate a triangle. The area between the curve and the low threshold is then used to compute the GDD.
 - **Single Triangle (with Horizontal Cutoff):** Uses the low and high daily temperatures to compute a set of two linear equations to generate a triangle. Then it adjusts any temperatures above the upper threshold to the upper threshold. The remaining area between the curve and the low threshold is then used to compute the GDD.

Fonte: LABAUT, 2016.

Figura 517 – Guia do usuário do HOBOWare Pro GrowingDegreeDaysAssistant, folha 2.

Growing Degree Days Assistant User's Guide

- **Single Sine (no Cutoff):** Uses the low and high daily temperatures to compute a sine wave that assumes the low temperature occurred at midnight and the high temperature occurred at noon. The area between the curve and the low threshold is then used to compute the GDD.
 - **Single Sine (with Horizontal Cutoff):** Uses the low and high daily temperatures to compute a sine wave that assumes the low temperature occurred at midnight and the high temperature occurred at noon. Then it adjusts any temperatures above the upper threshold to the upper threshold. The remaining area between the curve and the low threshold is then used to compute the GDD.
 - **Actual Temperature Method (no Cutoff):** Uses the logging interval of the temperature data to perform a numerical integration. The area between the curve and the low threshold is used to compute the GDD.
 - **Actual Temperature Method (with Horizontal Cutoff):** Adjusts any temperatures above the upper threshold to the upper threshold. Then it uses the logging interval of the temperature data to perform a numerical integration. The area between the curve and the low threshold is then used to compute the GDD.
 - **Actual Temperature Method (with Vertical Cutoff):** Uses the logging interval of the temperature data to perform a numerical integration. Any interval in which the temperature exceeds the upper threshold is excluded from the calculation. The remaining area between the actual curve and the low threshold is then used to compute the GDD.
5. Select lower and upper Development Threshold values. These are the minimum and maximum thresholds that will be used in the GDD calculation. Use the sliders to set these thresholds, or enter the values manually. If the calculation method you chose does not use an upper threshold, the upper threshold option will be disabled. Temperatures are in degrees Fahrenheit if your default unit preference is US, and in degrees Celsius if your default unit preference is SI.
 6. In the Biofix Parameters panel, choose a date that marks the beginning of the development phase for the Biofix date. The dates in this list are the full days contained in the datafile.
 7. In the Degree Days to Event, enter the number of degree days needed to reach an event of interest (harvest time, pest emergence, etc.). This will create an alarm line on the graph to indicate when the event took place. Degree days are in Fahrenheit (DDf) if your default unit preference is US, and in Celsius (DDc) if your default unit preference is SI.
 8. In the Event Description field, type any text to identify the event (optional).
 9. In the Resultant Series Name field, keep the default name or type a new one.
 10. Type any User Notes concerning the series you are creating (optional).
 11. Click the Create New Series button.
 12. The new series is listed and selected in the Plot Setup window. Click the Plot button.
- The scaled series will appear in the plot and the settings for the scaled series are listed in the Details pane:

1.3 Sensor de vento T-DCI-F900-S-P, ONSET Corporation

Figura 518 – Especificações do sensor de vento T-DCI-F900-S-P.

F900 Series

Airflow Measurement

Standard medium is air at standard pressure (101.3 kPa, 29.95" Hg). For altitude compensation and use with other gases, please contact DegreeC.

0.15 - 2 m/s (30 - 394 fpm)
0.15 - 5 m/s (30 - 985 fpm)
0.15 - 10 m/s (30 - 1969 fpm)

Available Airflow Accuracies

15 - 35°C Greater of ±10% of reading or ±0.05 m/s (10 fpm) or ±1% of full-scale

15 - 35°C Greater of ±5% of reading or ±0.05 m/s (10 fpm) or ±1% of full-scale

Output resolution: 4,000 steps.
Repeatability: ±1% under same conditions

Temperature Measurement

Range 0 - 70°C (50 - 140°F)	Available on TTL output only
Accuracy ±1°C above 1 m/s (196 fpm) ±1.5°C below 1 m/s (196 fpm)	Resolution is ±0.1°C

Electrical Specifications

Supply Voltage 7-13 VDC	Warm-up Time <5 seconds
Supply Current 40-75 mA	Operating Temperature 0 - 70°C (32-158°F)
Response Time 1.5 seconds	Storage Temperature -10 to 100°C
Output is linear 0-4 VDC full scale for calibrated range, up to 4.9V beyond calibrated range (airflow only) or TTL level RS-232 (both airflow & temperature).	

Mechanical Specifications

Dimensions	100 mm long X 12 mm diameter for standard unit, 91 mm X 12 mm for long tube with remote sensor heads
Vibration	Up to 25 G's
Acceptance Angles	Standard, rod w/flange, plastic heads are ±30°, low-profile is ±45°, XS blade is ±60° from perpendicular

Connection Specifications

Pin 1 Black	Supply Return
Pin 2 Red	Supply 7-13 VDC
Pin 3 White	Analog Airflow Output (0-4Vout) for calibrated range, up to 4.9V beyond calibrated range.
Pin 4 Orange	Digital serial output - 19200 BPS, RS232 protocol, TTL level, 8 bit, 1 stop bit - RXD
Pin 5 Yellow	Digital serial input - 19200 BPS, RS232 protocol, TTL levels, 8 bit, 1 stop bit - TXD
Connector	Molex#22-01-2057 or equivalent

Part Number Format

F900 - V - A - B - S - L

<p>V = Velocity Range</p> <p>N = 0.15 - 2 m/s O = 0.15 - 5 m/s P = 0.15 - 10 m/s</p>	<p>A = Accuracy Specification</p> <p>5 = Greater of 5% of reading or ±0.05 m/s or 1% full-scale 10 = Greater of 10% of reading or ±0.05 m/s or 1% full-scale</p> <p>B = Body Type</p> <p>0 = Standard (Default) -short tube 1 = Long tube (for remote sensor heads)</p>	<p>S = Sensor Head Type (for B = 1 ONLY)</p> <p>0 = Plastic 1 = Low Profile 2 = 50 mm (2") SS wand /w flange 4 = 100 mm (4") SS wand /w flange 6 = 150mm (6") SS wand /w flange 9 = XS Blade</p>	<p>L = Sensor Cable Length (for B = 1 ONLY)</p> <p>2 = 2 m</p>
---	---	---	---

User Manual available at www.degreeC.com

Engineered Airflow. Intelligent Cooling.

www.degreeC.com

Doc No. DS-001-D

Fonte: LABAUT, 2016.

1.4 Sensores de temperatura HOBO TMC6-HD, TMC20-HD e TMC50-HD, ONSET Corporation

Figura 519 – Especificações do sensor de temperatura HOBO TMCx-HD.

TMCx-HD Water/Soil Temperature Sensor

For use with HOBO® U12 and UX120-006M data loggers and ZW data nodes

Specifications

Measurement Range	-40° to 50°C (-40° to 122°F) in water; -40° to 100°C (-40° to 212°F) in air
Accuracy with U12	±0.25°C from 0° to 50°C (±0.45°F from 32° to 122°F), insert probe 2.3 cm (0.9 inches) minimum; see Plot A
Accuracy with ZW	±0.21°C from 0° to 50°C (±0.38°F from 32° to 122°F), insert probe 2.3 cm (0.9 inches) minimum; see Plot B
Accuracy with UX120-006M	±0.15°C from 0° to 50°C (±0.27°F from 32° to 122°F), insert probe 2.3 cm (0.9 inches) minimum; see Plot C
Resolution with U12	0.03° at 20°C (0.05° at 68°F)
Resolution with ZW	0.02°C at 25°C (0.04°F at 77°F)
Resolution with UX120-006M	0.002° at 25°C (0.003° at 77°F)
Drift	<0.1°C (<0.2°F) per year
Response time in air	2 min. typical to 90% in air moving 1 m/sec (2.2 mph)
Response time in stirred water	30 sec. typical to 90%
Operating range	Sensor tip and cable immersion in fresh water up to +50°C (122°F) for 1 year
Housing	Copper-plated sensor tip
Dimensions	5.1 x 33 mm (0.2 x 1.3 inches)
Weight	34 g (1.1 oz)

Plot A: U12 Accuracy*

Plot B: ZW Accuracy*

Plot C: UX120-006M Accuracy*

*Accuracy shown in plots outside the 0 to 50°C range is typical.

Mounting Considerations:

- Mount the sensor where there is good air circulation for measuring air temperature.
- Mount the sensor off the mounting surface so temperature measurements are not affected by the surface itself.

onset
HOBO Data Loggers

1-800-468-6999 (354-4577) • 508-753-9900
www.onsetcomp.com • hq@onsetcomp.com

© 1983–2015 Onset Computer Corporation. All rights reserved. Onset and HOBO are trademarks or registered trademarks of Onset Computer Corporation. All other trademarks are the property of their respective companies.

5679-E

Fonte: LABAUT, 2016.

1.5 Câmera Termográfica FLIR i40, FLIR Systems, INC

Figura 520 – Especificações da FLIR i40, parte 1.

Imaging and optical data	
IR resolution	120 x 120 pixels
Thermal sensitivity/NETD	<0.10°C (<0.18°F) @ +25°C (+77°F) / 100 mK
Field of view (FOV) / Minimum focus distance	25° x 25° / 0.10-m (0.33 ft.)
Spatial resolution (IFOV)	3.64 mrad
Image frequency	9 Hz
Focus	Manual
Focal Plane Array (FPA) / Spectral range	Uncooled microbolometer / 7.5–13 µm
Image presentation	
Display	Built-in 3.5 in. LCD, 256k colors, 240 x 320 pixels
Image modes	IR image, visual image, Picture in Picture, thumbnail gallery
Picture in Picture	IR area on visual image
Measurement	
Object temperature range	-20 to +120°C (-4 to +248°F) 0 to 350°C (32 to +662°F)
Accuracy	±2°C (±3.6°F) or ±2% of reading
Measurement analysis	
Spotmeter	Center spot
Area	1 box with min./max.
Emissivity correction	Variable from 0.1 to 1.0 or selected from list of materials
Reflected apparent temperature correction	Automatic, based on input of reflected temperature
IR window auto-correction	Automatic, based on inputs of optics/window transmission and temperature
Set-up	
Menu commands	Palettes (Black and White, Iron and Rainbow), image adjustment (auto/manual)
Set-up commands	Local adaptation of units, language, date and time formats; automatic shutdown, display intensity
Storage of images	
Image storage	Standard JPEG, including measurement data, on memory card

Fonte: LABAUT, 2016.

Figura 519 – Especificações da FLIR i40, parte 2.

Digital camera	
Built-in digital camera	0.6 Mpixels (768 × 768 pixels), and two LED lights
Digital camera, focus	Minimum focus distance 0.4 m (1.3 ft.)
Laser pointer	
Laser	Semiconductor AlGaInP diode laser, Class 2
Data communication interfaces	
USB	<ul style="list-style-type: none"> • USB-A: Connect external USB device (copy to memory stick) • USB Mini-B: Data transfer to and from PC / streaming MPEG-4
Power system	
Battery	Li Ion (field replaceable), 5 hours operating time
Charging system	In camera, AC adapter, 2-bay charger or 12 V from a vehicle
Power management	Automatic shutdown (user selectable)
AC operation	AC adapter, 90–260 VAC, 50/60 Hz, 12 V output to camera
Environmental data	
Operating temperature range	–15 to +50°C (–5 to +122°F)
Storage temperature range	–40 to +70°C (–40 to +158°F)
Humidity (operating and storage)	IEC 68-2-30/24 h 95% relative humidity +25°C to +40°C (+77°F to +104°F)
Encapsulation	IP 54 (IEC 60529)
Bump	25 g (IEC 60068-2-29)
Vibration	2 g (IEC 60068-2-6)
Physical data	
Camera weight, incl. battery	0.60 kg (1.32 lb)
Camera size (L × W × H)	235 × 81 × 175 mm (9.3 × 3.2 × 6.9 in.)

Fonte: LABAUT, 2016.

- 2 Instrumentos do Laboratório de Sistemas Fotovoltaicos (LSF) do IEE (Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo).
As especificações técnicas foram fornecidas pelo LSF

2.1 Data Logger CR 10X, CAMPBELL SCIENTIFIC, INC

Figura 521 – Especificações do Data Logger CR 10X.

CR10X Specifications

Electrical specifications are valid over a -25° to +50°C range unless otherwise specified; non-condensing environment required. To maintain electrical specifications, Campbell Scientific recommends recalibrating dataloggers every two years.

PROGRAM EXECUTION RATE

Program is synchronized with real-time up to 64 Hz. One channel can be measured at this rate with uninterrupted data transfer. Burst measurements up to 750 Hz are possible over short intervals.

ANALOG INPUTS

NUMBER OF CHANNELS: 6 differential or 12 single-ended, individually configured. Channel expansion provided by AM1632 or AM416 Relay Multiplexers and AM25T Thermocouple Multiplexers.

ACCURACY: $\pm 0.1\%$ of FSR (-25° to 50°C);
 $\pm 0.05\%$ of FSR (0° to 40°C);
e.g., $\pm 0.1\%$ FSR = $\pm 5.0\text{ mV}$ for $\pm 2500\text{ mV}$ range

RANGE AND RESOLUTION:

Full Scale Input Range (mV)	Differential Resolution (μV)	Single-Ended Resolution (μV)
± 2500	33.3	66.6
± 250	3.33	6.66
± 25	0.33	0.66

INPUT SAMPLE RATES: Includes the measurement time and conversion to engineering units. The fast and slow measurements integrate the signal for 0.25 and 2.72 ms, respectively. Differential measurements incorporate two integrations with reversed input polarities to reduce thermal offset and common mode errors.

Fast single-ended voltage:	2.6 ms
Fast differential voltage:	4.2 ms
Slow single-ended voltage:	5.1 ms
Slow differential voltage:	9.2 ms
Differential with 60 Hz rejection:	25.9 ms
Fast differential thermocouple:	8.6 ms

INPUT NOISE VOLTAGE (for $\pm 2.5\text{ mV}$ range):
Fast differential: $0.82\text{ }\mu\text{V rms}$
Slow differential: $0.25\text{ }\mu\text{V rms}$
Differential with 60 Hz rejection: $0.18\text{ }\mu\text{V rms}$

COMMON MODE RANGE: $\pm 2.5\text{ V}$

DC COMMON MODE REJECTION: $>140\text{ dB}$

NORMAL MODE REJECTION: 70 dB (60 Hz with slow differential measurement)

INPUT CURRENT: 50 nA maximum

INPUT RESISTANCE: 20 Gohms typical

ANALOG OUTPUTS

DESCRIPTION: 3 switched, active only during measurement, one at a time.

RANGE: $\pm 2.5\text{ V}$

RESOLUTION: 0.67 mV

ACCURACY: $\pm 5\text{ mV}$; $\pm 2.5\text{ mV}$ (0° to 40°C)

CURRENT SOURCING: 25 mA

CURRENT SINKING: 25 mA

FREQUENCY SWEEP FUNCTION: The switched outputs provide a programmable sweep frequency, 0 to 2.5 V square wave for exciting vibrating wire transducers.

RESISTANCE MEASUREMENTS

MEASUREMENT TYPES: The CR10X provides ohmic bridge measurements of 4- and 6-wire full bridge, and 2-, 3-, and 4-wire half bridges. Precise dual polarity excitation using any of the switched outputs eliminates dc errors. Conductivity measurements use a dual polarity 0.75 ms excitation to minimize polarization errors.

ACCURACY: $\pm 0.02\%$ of FSR plus bridge resistor error.

PERIOD AVERAGING MEASUREMENTS

The average period for a single cycle is determined by measuring the duration of a specified number of cycles. Any of the 12 single-ended analog input channels can be used. Signal attenuation and ac-coupling are typically required.

INPUT FREQUENCY RANGE:

Signal peak-to-peak ¹	Min.	Max.	Pulse w.	Min. Freq. ²	Max. Freq. ²
500 mV	5.0 V	2.5 μs	250 kHz		
10 mV	2.0 V	10 μs	50 kHz		
5 mV	2.0 V	62 μs	5 kHz		
2 mV	2.0 V	100 μs	5 kHz		

¹Signals centered around datalogger ground

²Assuming 50% duty cycle

RESOLUTION: 35 ns divided by the number of cycles measured

ACCURACY: $\pm 0.01\%$ of reading (number of cycles ≥ 100)
 $\pm 0.03\%$ of reading (number of cycles < 100)

TIME REQUIRED FOR MEASUREMENT: Signal period times the number of cycles measured plus 1.5 cycles = 2 ms

PULSE COUNTERS

NUMBER OF PULSE COUNTER CHANNELS: 2 eight-bit or 1 sixteen-bit; software selectable as switch closure, high frequency pulse, and low level ac.

MAXIMUM COUNT RATE: 16 kHz, eight-bit counter; 400 kHz, sixteen-bit counter. Channels are scanned at 8 or 64 Hz (software-selectable).

SWITCH CLOSURE MODE

Minimum Switch Closed Time: 5 ms
Minimum Switch Open Time: 6 ms
Maximum Bounce Time: 1 ms open without being counted

HIGH-FREQUENCY PULSE MODE

Minimum Pulse Width: 1.2 μs
Maximum Input Frequency: 400 kHz
Voltage Thresholds: Count upon transition from below 1.5 V to above 3.5 V at low frequencies. Larger input transitions are required at high frequencies because of input filter with 1.2 μs time constant. Signals up to 400 kHz will be counted if centered around $\pm 2.5\text{ V}$ with deviations $\geq \pm 2.5\text{ V}$ for $\geq 1.2\text{ }\mu\text{s}$.
Maximum Input Voltage: $\pm 20\text{ V}$

LOW LEVEL AC MODE

(Typical of magnetic pulse flow transducers or other low voltage, sine wave outputs.)

Input Hysteresis: 14 mV

Maximum ac Input Voltage: $\pm 20\text{ V}$

Minimum ac Input Voltage:

(Sine wave mV RMS)	Range (Hz)
25	1.0 to 1000
200	0.5 to 10,000
1000	0.3 to 10,000

DIGITAL I/O PORTS

8 ports, software selectable as binary inputs or control outputs. 3 ports can be configured to count switch closures up to 40 Hz.

OUTPUT VOLTAGES (no load): high $5.0\text{ V} \pm 0.1\text{ V}$; low $< 0.1\text{ V}$

OUTPUT RESISTANCE: 500 ohms

INPUT STATE: high $3.0\text{ to }5.5\text{ V}$; low $< 0.5\text{ to }0.8\text{ V}$

INPUT RESISTANCE: 100 kohms

SDI-12 INTERFACE STANDARD

Digital I/O Ports C1-C8 support SDI-12 asynchronous communication; up to ten SDI-12 sensors can be connected to each port. Meets SDI-12 Standard version 1.2 for datalogger and sensor modules.

CR10XTCR THERMOCOUPLE REFERENCE

POLYNOMIAL LINEARIZATION ERROR: Typically $\pm 0.5^\circ\text{C}$ (-35° to $+50^\circ\text{C}$); $\pm 0.1^\circ\text{C}$ (-24° to $+45^\circ\text{C}$).
INTERCHANGEABILITY ERROR: Typically $\pm 0.2^\circ\text{C}$ (0° to $+50^\circ\text{C}$) increasing to $\pm 0.4^\circ\text{C}$ ($< -35^\circ\text{C}$).

CE COMPLIANCE (as of 09/01)

STANDARD(S) TO WHICH CONFORMITY IS DECLARED:

EN55022:1995 and EN61326:1998

EMI and ESD PROTECTION

IMMUNITY: Meets or exceeds following standards:

ESD: per IEC 1000-4-2; $\pm 8\text{ kV}$ air, $\pm 4\text{ kV}$ contact discharge

RF: per IEC 1000-4-3; 3 V/m, 80-1000 MHz

EFT: per IEC 1000-4-4; 1 kV power, 500 V I/O

Surge: per IEC 1000-4-5; 1 kV power and I/O

Conducted: per IEC 1000-4-6; 3 V 150 kHz-80 MHz

Emissions and immunity performance criteria available on request.

CPU AND INTERFACE

PROCESSOR: Hitachi 5303

PROGRAM STORAGE: Up to 16 kbytes for active program; additional 16 kbytes for alternate programs. Operating system stored in 128 kbytes Flash memory.

DATA STORAGE: 128 kbytes SRAM standard (approximately 60,000 data values). Additional 2 kbytes Flash available as an option.

OPTIONAL KEYBOARD DISPLAY: 8-digit LCD (0.5" digits)

PERIPHERAL INTERFACE: 9-pin D-type connector for keyboard display, storage module, modem, printer, card storage module, and RS-232 adapter.

BAUD RATES: Selectable at 300, 1200, 9600 and 76,800 bps for synchronous devices. ASCII communication protocol is one start bit, one stop bit, eight data bits (no parity).

CLOCK ACCURACY: ± 1 minute per month

SYSTEM POWER REQUIREMENTS

VOLTAGE: 9.6 to 16 Vdc

TYPICAL CURRENT DRAIN: 1.3 mA quiescent, 13 mA during processing, and 46 mA during analog measurement.

BATTERIES: Any 12 V battery can be connected as a primary power source. Several power supply options are available from Campbell Scientific. The Model CR2432 lithium battery for clock and SRAM backup has a capacity of 270 mAh.

PHYSICAL SPECIFICATIONS

SIZE: 7.8" x 3.5" x 1.5" - Measurement & Control Module; 9" x 3.5" x 2.9" - with CR10WP Wiring Panel. Additional clearance required for serial cable and sensor leads.

WEIGHT: 2 lbs

WARRANTY

Three years against defects in materials and workmanship.

We recommend that you confirm system configuration and critical specifications with Campbell Scientific before purchase.

CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.

815 W. 1800 N. • Logan, Utah 84321-1784 • (435) 753-2342 • FAX (435) 750-9540
Offices also located in: Australia • Brazil • Canada • England • France • South Africa • Spain

Copyright © 1998, 2004
Campbell Scientific, Inc.
Printed March 2004

2.2 Anemômetro modelo 05103, CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.

Figura 522 – Especificações do anemômetro modelo 05103.

Specifications

Wind Speed

	05103 Wind Monitor	05103-45 Wind Monitor-Alpine	05106 Wind Monitor-MA	05305 Wind Monitor-AQ
Range	0 to 100 m s ⁻¹ (0 to 224 mph)			0 to 50 m s ⁻¹ (0 to 112 mph)
Accuracy	±0.3 m s ⁻¹ (±0.6 mph) or 1% of reading			±0.2 m s ⁻¹ (±0.4 mph) or 1% of reading
Starting Threshold	1.0 m s ⁻¹ (2.2 mph)		2.4 mph (1.1 m s ⁻¹)	0.4 m s ⁻¹ (0.9 mph)
Distance Constant (63% recovery)	2.7 m (8.9 ft)			2.3 m (5.9 ft)
Output	ac voltage (3 pulses per revolution); 1800 rpm (90 hz) = 8.8 m s ⁻¹ (19.7 mph)			ac voltage (3 pulses per revolution); 1800 rpm (90 hz) = 9.2 m s ⁻¹ (20.6 mph)
Resolution	0.0980 m s ⁻¹ /scan rate in seconds or (0.2192 mph)/scan rate in seconds			0.1624 m s ⁻¹ /scan rate in sec or (0.2290 mph)/scan rate in sec

Wind Direction

	05103 Wind Monitor	05103-45 Wind Monitor-Alpine	05106 Wind Monitor-MA	05305 Wind Monitor-AQ
Range	0° to 360° mechanical; 355° electrical (5° open)			
Accuracy	±3°	±5°	±3°	
Starting Threshold	1.1 m s ⁻¹ (2.4 mph)			0.5 m s ⁻¹ (1.0 mph)
Distance Constant (50% recovery)	1.3 m (4.3 ft)			1.2 m (3.9 ft)
Damping Ratio	0.3			0.45
Damped Natural Wavelength	7.4 m (24.3 ft)			4.9 m (16.1 ft)
Undamped Natural Wavelength	7.2 m (23.6 ft)			4.4 m (14.4 ft)
Output	analog dc voltage from potentiometer—resistance 10 kΩ; linearity 0.25%; life expectancy 50 million revolutions			
Power	switched excitation voltage supplied by datalogger			

Physical

	05103 Wind Monitor	05103-45 Wind Monitor-Alpine	05106 Wind Monitor-MA	05305 Wind Monitor-AQ
Operating Temperature Range	-50° to +50°C, assuming non-icing conditions			
Overall Height	37 cm (14.6 in)			38 cm (15 in)
Overall Length	55 cm (21.7 in)			65 cm (25.6 in)
Main Housing Diameter	5 cm (2 in)			
Propeller Diameter	18 cm (7.1 in)	14 cm (5.5 in)	18 cm (7.1 in)	20 cm (7.9 in)
Mounting Pipe Description	34 mm (1.34 in) outer diameter; standard 1/2 in IPS schedule 40			
Weight	1.5 kg (3.2 lb)	1 kg (2.2 lb)	1.5 kg (3.2 lb)	1.1 kg (2.5 lb)

Campbell Scientific, Inc. | 815 W 1800 N | Logan, UT 84321-1784 | (435) 227-9000 | www.campbellsci.com
 USA | AUSTRALIA | BRAZIL | CANADA | CHINA | COSTA RICA | ENGLAND | FRANCE | GERMANY | SOUTH AFRICA | SWEDEN

© 1991, 2014
 Campbell Scientific, Inc.
 February 3, 2014

Fonte: LSF, 2016.

2.3 Termo-higrômetro modelo HMP 45C, CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.

Figura 523 – Especificações do termo higrômetro modelo HMP 45C.

Manufacturer Specifications

Supply Voltage:	12 Vdc nominal	Relative Humidity (RH)	
Current Consumption:	≤4 mA (active)	Sensor:	Vaisala's HUMICAP® H-chip
Dimensions		Measurement Range:	0.8 to 100% RH; non-condensing
Diameter:	1 in. (2.5 cm)	Output Signal Range:	0.008 to 1 Vdc
Length:	10 in. (25.4 cm)	Accuracy at 20°C	
Weight:	0.6 lb. (0.27 kg)	against factory reference:	±1% RH
Filter:	0.2 µm Teflon® membrane	field-calibrated	
Filter Diameter:	0.75 in. (1.9 cm)	against references:	±2% RH (0 to 90% RH) ±3% RH (90% to 100% RH)
Operating Temperature:	-40° to +60°C	Temperature Dependence:	±0.05% RH/°C
Air Temperature		Long-Term Stability:	Typically, better than 1% RH per year
Temperature Sensor:	1000 ohm PRT	Response Time:	15 seconds with membrane filter (at 20°C, 90% response)
Measurement Range:	-39.2° to +60°C	Settling Time:	500 milliseconds
Output Signal Range:	0.008 to 1.0 V		
Temperature Accuracy:	see graph below

Notes:

- (1) The black outer jacket of the cable is Santoprene® rubber. This compound was chosen for its resistance to temperature extremes, moisture, and UV degradation. However, this jacket will support combustion in air. It is rated as slow burning when tested according to U.L. 94 H.B. and will pass FMVSS302. Local fire codes may preclude its use inside buildings.
- (2) The HMP45C is manufactured by Vaisala, Inc. (Woburn, MA) but cabled and modified by Campbell Scientific for use with our dataloggers.

Campbell Scientific, Inc. 815 W 1800 N Logan, Utah 84321-1784 (435) 753-2142 www.campbellsci.com

USA AUSTRALIA BRAZIL CANADA CHINA COLOMBIA ENGLAND FRANCE GERMANY SOUTH AFRICA SPAIN

Copyright © 1996, 2011
Campbell Scientific, Inc.
Printed January 2011

Fonte: LSF, 2016.

2.4 Piranômetro CMP6, CAMPBELL SCIENTIFIC, INC.

Figura 524 – Especificações do PIRANÔMETRO modelo CMP6.

Specifications			
	CMP6	CMP11	CMP21
ISO Classification	First Class	Secondary Standard	
Spectral Range	285 to 2800 nm		
Sensitivity	5 to 20 $\mu\text{W}/\text{W}^2/\text{m}^2$	7 to 14 $\mu\text{W}/\text{W}^2/\text{m}^2$	
Temperature Dependence of Sensitivity	< 4% (-10° to +40°C)	< 1% (-10° to +40°C)	< 1.9% (-20° to +50°C)
Response Time (95% of final value)	< 18 s	< 5 s	
Zero Off set Due To Thermal Radiation (200 W/m ²)	< 1.5 W/m ²	< 7 W/m ²	
Non-Stability (change/year)	< 1%	< 0.5%	
Non-Linearity (0 to 1000 W/m ²)	< 1%	< 0.2%	
Directional Error (up to 80° with 1000 W/m ² beam)	< 20 W/m ²	< 10 W/m ²	
Tilt Error	< 1%	< 0.2%	
Level Accuracy	0.1°		
Impedance	20 to 200 Ω	10 to 100 Ω	
Operating Temperature	-40° to +80°C		
Typical Signal Output for Atmospheric Applications	0 to 20 mV	0 to 15 mV	
Maximum Irradiance	2000 W/m ²	4000 W/m ²	
Expected Daily Uncertainty	< 5%	< 2%	
Dimensions	Width w/shield: 15 cm (5.9 in); Height: 9.25 cm (3.64 in); Dome Diameter: 5 cm (2 in)		
Weight with 33 ft cable	0.9 kg (2 lb)		

Fonte: LSF, 2016.