

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

Indyanara Bianchet Marcelino

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DA TÉCNICA DE
RESFRIAMENTO EVAPORATIVO COM
BOMBEAMENTO PASSIVO APLICADA A
EDIFICAÇÕES**

Florianópolis

2017

Indyanara Bianchet Marcelino

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DA TÉCNICA DE
RESFRIAMENTO EVAPORATIVO COM
BOMBEAMENTO PASSIVO APLICADA A
EDIFICAÇÕES**

Dissertação submetida ao Programa
de Pós-Graduação em Engenharia Me-
cânica para a obtenção do Grau de
Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Alexandre Kupka
da Silva, Ph.D.

Coorientador: Prof. Saulo Güths, Dr.

Florianópolis

2017

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Marcelino, Indyanara Bianchet
Análise teórico-experimental da técnica de
resfriamento evaporativo com bombeamento passivo
aplicada a edificações / Indyanara Bianchet
Marcelino ; orientador, Alexandre Kupka da Silva;
coorientador, Saulo Gúths - SC, 2017.
131 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2017.

Inclui referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Sistemas de
resfriamento passivo em coberturas. 3. Resfriamento
evaporativo. 4. Bombeamento passivo. 5. Meios
porosos. I. Silva, Alexandre Kupka da. II. Gúths ,
Saulo. III. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV.
Título.

Indyanara Bianchet Marcelino

**ANÁLISE TEÓRICO-EXPERIMENTAL DA TÉCNICA DE
RESFRIAMENTO EVAPORATIVO COM
BOMBEAMENTO PASSIVO E AUTO REGULÁVEL
APLICADA A EDIFICAÇÕES**

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, especialidade Engenharia e Ciências Térmicas, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis , 20 de março de 2017

Prof. Jonny Carlos da Silva, Dr.
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica

Banca examinadora:

Prof. Alexandre Kupka da Silva, Ph.D.
Presidente - Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Saulo Güths, Dr.
Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Jader Riso Barbosa Jr., Ph.D.
Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Roberto Lamberts, Ph.D
Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Samuel Luna de Abreu, Dr.Eng.
Instituto Federal de Santa Catarina

Dedico esse trabalho à minha mãe, pessoa
mais importante da minha vida

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha família. De forma muito especial, agradeço aos meus pais Geovane e Cláudia por me proporcionarem todo suporte necessário à minha formação acadêmica e por sempre me apoiarem em todas as decisões, incondicionalmente. À minha irmã Ingryd, que também iniciará nessa longa e prazerosa jornada acadêmica. Ao Patrício pela paciência, apoio e compreensão de sempre.

Aos professores Ph.D. Alexandre Kupka da Silva e Dr. Saulo Güths por todo conhecimento e aprendizado que me proporcionaram, pela confiança, atenção e pelas palavras motivadoras.

Aos coordenadores do LEPTEN, Prof. D.Sc. Sérgio Colle, Prof. Ph.D. Márcia Barbosa Henriques Mantelli e ao Prof. Dr. Júlio César Passos pelo apoio e pela infraestrutura.

À família LEPTEN, em especial aos amigos Juliano Oestreich, Felipe de Castro, Felipe Nassif, Felipe Battisti, Alan Sparenberger, Arthur Pandolfo, Gustavo Hoboldt, Vinicius Kramer, Leonardo Casagrande, Carlos Eduardo Laurentina, Luigi Passos, Henrique Carminnatti, Giovanni Delsoto, Bruna de Noni, Allan Starke, Selen Sousa, por terem me ensinado o verdadeiro significado de trabalho em equipe.

Ao Eng. Edevaldo Brandílio Reinaldo e ao M.Eng. Júlio Nelson Scussel por toda ajuda, e suporte na construção da bancada experimental.

À Ana Roberta Gomes e a Rosângela Avi de Sousa pela amizade, apoio, por toda ajuda e pelos conselhos.

Ao Adriano, Diego, Leticya e Elaine, amigos que me acompanham desde a graduação, pelas soluções de problemas em grupo, pela amizade.

Ao Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) e ao Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E) pelos ensaios realizados.

Ao CNPq pelo suporte durante o curso.

Aos amigos de sempre e a todos que contribuíram para a conclusão desse trabalho.

O que não te desafia, não te transforma.

Desconhecido

RESUMO

Edificações são diariamente expostas à radiação solar, a qual é parcialmente absorvida pelas paredes e coberturas e transferida para seu interior. Isso resulta em um aumento da temperatura da estrutura e, conseqüentemente, em um maior consumo de energia elétrica proveniente do uso de condicionadores de ar. Uma alternativa para promover conforto térmico no interior de edificações, sem consumir energia elétrica, é através da utilização de sistemas de resfriamento passivos em lajes e coberturas, como os evaporativos. O presente trabalho teve como objetivo principal avaliar, teórica e experimentalmente, os efeitos térmicos da aplicação de um sistema de resfriamento evaporativo sobre uma cobertura. Para isso, foi construída uma bancada experimental, a qual foi exposta a condições reais ambientais. Dados de temperatura interna da cobertura, fluxo de calor, irradiação solar global, velocidade do ar, direção do vento, temperatura ambiente, massa de água evaporada e umidade relativa foram adquiridos, durante dias típicos de verão na cidade de Florianópolis. A evaporação do sistema proposto ocorre através de um material poroso. Água é bombeada por toda a superfície do material, sem a utilização de trabalho mecânico, contando somente com suas propriedades intrínsecas, como capilaridade. Os meios porosos estudados foram: discos de fibra cerâmica encontradas em duas espessuras, 13 e 6 mm, e tecido de algodão. Entre os materiais avaliados, a disposição do material de fibra cerâmica de maior espessura sobre a cobertura foi o que apresentou os melhores resultados, no que se refere a diminuição de fluxo térmico transferido para o interior de edificações. Para um valor de radiação incidente de 1000 Wm^{-2} , o material poroso de 13 mm, conseguiu reduzir o fluxo de calor transferido para o interior de uma cobertura, aproximadamente 12 vezes quando seco e 10 vezes quando umedecido, se comparados à uma cobertura exposta. O fato do meio evaporativo mostrar-se menos eficiente que o meio seco, não era esperado. Dois fatores foram determinantes: o fato da absorvidade solar aumentar quando o meio é umedecido e o fato do meio umedecido ser muito mais condutor que o meio seco. Apesar disso, o meio evaporativo pode mostrar-se mais competitivo em climas mais secos, devido ao aumento da taxa de evaporação quando tem-se baixos valores de umidade relativa, e ainda em situações onde o resfriamento noturno é favorável, uma vez que o meio poroso seco isola a cobertura, dificultado a perda de calor durante a noite, enquanto o

umedecido, por ser mais condutor, permite uma troca de calor entre o ambiente interno e externo. Uma possível estratégia seria manter o meio umedecido durante a noite e permitir a secagem durante o dia (cortando o suprimento de água). A mesma estratégia poderia ser adotada para climas temperados, mantendo o meio umedecido em períodos quentes e mantê-lo seco nos períodos frios. Outro resultado importante encontrado neste trabalho, é que, quando utilizou-se o tecido de algodão, o material menos espesso entre os estudados, o desempenho do sistema evaporativo, foi melhor do que o do material seco, mostrando uma relação entre a espessura do meio poroso e a eficiência do sistema evaporativo.

Palavras-chave: Sistemas de resfriamento passivo, Resfriamento evaporativo, Cobertura, Auto bombeamento, Meios porosos

ABSTRACT

Buildings are exposed to solar radiation in a daily basis, part of which is absorbed by the walls and roof, being transferred to its interior, resulting in an increase in the temperature of the structure and, consequently, a greater consumption of electrical energy due to the use of air conditioners. An alternative to promote thermal comfort inside buildings without consuming electrical energy is the use of passive cooling systems on roofs *e.g.* evaporative. The present work aims to evaluate, theoretically and experimentally, the thermal effects of an evaporative cooling system placed on a roof. For this purpose, an experimental apparatus was designed which was exposed to real environmental conditions. Indoor temperature, heat flux, global solar irradiance, air velocity, wind direction, ambient temperature, evaporated water mass and relative humidity were measured during typical summer days in the city of Florianópolis. The evaporation of the proposed system occurs through a porous material. Water is pumped through the entire surface of the material with no external mechanical work, relying only on its intrinsic properties, *i.e.*, capillarity. The porous media studied were: ceramic fiber disks, which thicknesses of 13 and 6 mm, and cotton fabric. Among the studied materials, the thickest ceramic fiber showed the best results regarding the reduction of the heat flux transferred through the slab. For an incident global radiation of 1000 Wm^{-2} , the 13 mm-thick porous material was able to reduce the heat load transferred through the roof by a factor of 12 when dry and by a factor of 10 when wet when compared to an exposed roof. The fact that the wet porous medium was less efficient than the dry one was not expected. Two factors were determinant: solar absorptivity increases when the medium is wetted and that the wet material has a higher thermal conductivity than when it is dry. Nevertheless, the wet medium may be more competitive in drier climates, due to the increase of the evaporation rate when low values of relative humidity were measured. Additionally, cooling during the night is favored in wet medium, given that the dry porous medium insulates the roof, hindering the loss of heat during the night, while the wet material, due to higher conductances, allows a higher heat flux between the internal and external environments. One possible strategy would be to keep the medium wetted at night and allow drying during the day (by cutting off the water supply). The same strategy could be adopted for temperate climates by keeping the

medium moistened in hot periods and keeping it dry in cold periods. Another important result found in this work is that, when using a material with a lower thickness (the cotton fabric), the performance of the evaporative system was better than the system with the dry material, showing a relationship between the thickness of the porous medium and the efficiency of the evaporative system.

Keywords: Passive cooling systems, Evaporative cooling, Roof, Self pumping, Porous media

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Consumo final energético, por fonte, pra o setor residencial. Retirado de EPE (2014b)	27
Figura 2	Participação dos eletrodomésticos mais importantes no consumo médio domiciliar no Brasil. Retirado de Eletrobrás (2009)	28
Figura 3	Árvore mais alta do mundo. Retirado de <i>National Geographic</i>	30
Figura 4	Representação esquemática do ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor.	34
Figura 5	Representação esquemática do sistema de refrigeração por absorção	35
Figura 6	Esquema do princípio de funcionamento do RED. Retirado de Porumb et al. (2016)	36
Figura 7	Esquema do princípio de funcionamento de um equipamento de REI. Retirado de Porumb et al. (2016)	36
Figura 8	a) Principais componentes do sistema evaporativo. b) Corte transversal da seção de testes. Retirado de Crawford e da Silva (2014)	41
Figura 9	Representação esquemática do sistema utilizado para refrigerar a seção de testes	46
Figura 10	Representação esquemática da bancada experimental ..	48
Figura 11	Etapas da montagem do trocador de calor espiral	50
Figura 12	Representação esquemática da vista lateral do trocador de calor	50
Figura 13	Posicionamento dos termorresistores e transdutores presentes na parte inferior da cobertura	53
Figura 14	Representação esquemática e corte transversal da seção de testes. Detalhe da superfície inferior da cobertura e da parte espiral do trocador de calor	54
Figura 15	Detalhes da seção de testes	55
Figura 16	Seção de testes e representação esquemática para o teste preliminar (MS/MS)	56
Figura 17	Seção de testes e representação esquemática dos experimentos não evaporativos (MS/SN)	57
Figura 18	Seção de testes e representação esquemática para os ex-	

perimentos evaporativos (ME/MS)	59
Figura 19 Imagens obtidas através do MEV, para o material de fibra cerâmica.....	63
Figura 20 Imagens obtidas através do MEV, para o tecido de algodão	63
Figura 21 Modelo Térmico (a) Cobertura exposta ao ambiente, (b) Material poroso seco disposto sobre a cobertura (c) Material poroso evaporativo disposto sobre a cobertura	66
Figura 22 Representação esquemática da hipótese de o semidisco ser um conjunto de infinitas placas planas	68
Figura 23 Representação esquemática do teste MS/MS.....	71
Figura 24 Temperaturas obtidas no teste MS/MS	72
Figura 25 Fluxos de calor obtidos no teste MS/MS.....	72
Figura 26 Análise de sobreposição dos sensores sobre o trocador de calor	73
Figura 27 Representação esquemática do teste MS/SN.....	74
Figura 28 Temperatura obtidas no teste MS/SN com o material poroso de 13 mm de espessura.....	75
Figura 29 Fluxos de calor e irradiação solar global obtidos no teste MS/SN com o material poroso de 13 mm de espessura.....	75
Figura 30 Temperaturas obtidas no teste MS/SN com o material poroso de 6 mm de espessura.....	77
Figura 31 Fluxos de calor e irradiação solar global obtidos no teste MS/SN com o material poroso de 6 mm de espessura.....	78
Figura 32 Temperaturas obtidas no teste MS/SN para o tecido de algodão	79
Figura 33 Fluxos de calor e irradiação solar global obtidos no teste MS/SN para o tecido de algodão	79
Figura 34 Representação esquemática do teste ME/MS.....	81
Figura 35 Temperaturas obtidas no teste ME/MS para o material poroso de 13 mm de espessura.....	82
Figura 36 Fluxos de calor e irradiação solar global obtidos no teste ME/MS para o material poroso de 13 mm de espessura.....	82
Figura 37 Temperaturas obtidas no teste ME/MS para o material poroso de 6 mm de espessura.....	85
Figura 38 Fluxos de calor e irradiação solar horizontal obtidos no teste ME/MS para o material poroso de 6 mm de espessura	85
Figura 39 Temperaturas obtidas no teste ME/MS para o tecido de	

algodão	87
Figura 40 Fluxos de calor e irradiação solar horizontal obtidos no teste ME/MS para o tecido de algodão	88
Figura 41 Fator associado ao sistema evaporativo e umidade relativa do ar, ao longo do dia, para o teste ME/MS com material poroso de 13 mm de espessura.....	89
Figura 42 Fator associado ao sistema evaporativo e umidade relativa do ar, ao longo do dia, para o teste ME/MS com material poroso de 6 mm de espessura.....	90
Figura 43 Fator associado ao sistema evaporativo e umidade relativa do ar, ao longo do dia, para o teste ME/MS com o tecido de algodão	91
Figura 44 Fator associado ao sistema evaporativo em função da umidade relativa do ar, para o teste ME/MS com o material poroso de 13 mm de espessura	91
Figura 45 Fator associado ao sistema evaporativo em função da umidade relativa do ar, para o teste ME/MS com o material poroso de 6 mm de espessura	92
Figura 46 Fator associado ao sistema evaporativo em função da umidade relativa do ar, para o teste ME/MS com o tecido de algodão	92
Figura 47 Perda de massa de água ao longo do dia para os testes evaporativos	94
Figura 48 Vazão mássica e irradiação solar horizontal obtidos ao longo do dia, para o teste realizado com o material de 13 mm de espessura.....	95
Figura 49 Vazão mássica e irradiação solar horizontal obtidos ao longo do dia, para o teste realizado com o material de 6 mm de espessura.....	96
Figura 50 Vazão mássica e irradiação solar horizontal obtidos ao longo do dia, para o teste realizado com o tecido de algodão	96
Figura 51 Irradiação solar global, calor perdido por evaporação e calor transferido para o interior da cobertura, para o teste ME/MS com o tecido de algodão.....	98
Figura 52 Resultado experimental versus simulado para o teste MS/SN com o material de 13 mm de espessura	103
Figura 53 Resultado experimental versus simulado para o teste ME/MS com o material de 13 mm de espessura	103
Figura 54 Resultado experimental versus simulado para o teste	

MS/SN com o material de 6 mm de espessura	104
Figura 55 Resultado experimental versus simulado para o teste ME/MS com o material de 6 mm de espessura	104
Figura 56 Resultado experimental versus simulado para o teste MS/SN com o tecido de algodão.....	106
Figura 57 Resultado experimental versus simulado para o teste ME/MS com o tecido de algodão.....	106
Figura 58 Princípio do método de mediação da resistência térmica	117
Figura 59 Curva característica para o termorresistor 01	123
Figura 60 Dados obtidos na calibração dos termopares tipo E....	125
Figura 61 Temperaturas obtidas no teste noturno	129
Figura 62 Fluxos de calor obtidos no teste noturno.....	130

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Sumário dos trabalhos selecionados.....	43
Tabela 2	Incertezas de medição relacionadas aos equipamentos presentes no aparato experimental.....	47
Tabela 3	Dimensões dos materiais porosos utilizados nos testes MS/SN.....	57
Tabela 4	Dimensões dos materiais porosos utilizados nos testes ME/MS.....	59
Tabela 5	Condutividade e resistência térmica da amostra seca e molhada.....	61
Tabela 6	Refletividade e absorvidade solar dos materiais utilizados nesse estudo.....	62
Tabela 7	Data, período e média das condições climáticas obtidas durante o experimento MS/MS.....	71
Tabela 8	Data, período e média das condições climáticas obtidas durante os experimentos MS/SN.....	74
Tabela 9	Data, período e média das condições climáticas obtidas durante os experimentos ME/MS.....	81
Tabela 10	Fatores dos sistemas de resfriamento passivo, utilizando-se o material poroso de 13 mm de espessura, para valores de irradiação solar global de 1000 Wm^{-2}	84
Tabela 11	Fatores calculados, utilizando-se o material poroso de 6 mm de espessura, para valores de irradiação solar global de 1000 Wm^{-2}	86
Tabela 12	Fator calculado, utilizando-se o tecido de algodão, para valores de irradiação solar global de 1000 Wm^{-2}	88
Tabela 13	Consumo de água no decorrer dos testes evaporativos..	94
Tabela 14	Diferenças de temperatura, fluxo de calor e valores do fator para as técnicas estudadas, obtidos para o valor de irradiação solar global de 1000 Wm^{-2}	100
Tabela 15	Erro quadrático médio (RMSE), entre os valores teóricos e experimentais, para os testes ME/MS e MS/SN.....	105
Tabela 16	Média dos valores adquiridos na calibração dos termorresistores tipo PT100 01, 02, 03, 04 e 06.....	121
Tabela 17	Média dos valores adquiridos na calibração dos termorresistores tipo PT100 07, 08, 09, 10 e 11.....	122

Tabela 18 Erros aleatórios para os valores adquiridos na calibração dos termorresistores do tipo PT100.....	122
Tabela 19 Equações características de calibração para os 10 termorresistores do tipo PT100.....	124
Tabela 20 Média e desvio padrão dos valores adquiridos na calibração dos termopares tipo E.....	124
Tabela 21 Equações características de calibração para os termopares tipo E.....	125
Tabela 22 Constante de calibração para os transdutores de fluxo de calor.....	126
Tabela 23 Correção do <i>off-set</i> para os termorresistores.....	131

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASHRAE	<i>American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BSRN	<i>Baseline Surface Radiation Network</i>
CB3E	Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações
CFC	Clorofluorcarbono
HFC	Hidrofluorcarbono
EES	<i>Engineering Equation Solver</i>
LabSolar	Laboratório de Energia Solar
LCME	Laboratório Central de Microscopia Eletrônica
LEPTEN	Laboratórios de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia
ME	Meio Poroso Evaporativo
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MS	Meio Poroso Seco
RED	Resfriamento Evaporativo Direto
REI	Resfriamento Evaporativo Indireto
SN	Sem Nada
TBU	Temperatura de Bulbo Úmido
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

α	Absortividade [-]
β	Ângulo de elevação [-]
A	Área da seção transversal [m ²]
A _{semi}	Área do semidisco [m ²]
L	Comprimento [m]
h _{LV}	Calor latente de vaporização [Jkg ⁻¹]
h _{conv}	Coefficiente de troca de calor por convecção [Wm ⁻² K ⁻¹]
k	Condutividade térmica [Wm ⁻¹ K ⁻¹]
q''	Densidade de fluxo de calor [Wm ⁻²]
δ	Espessura [m]
Q''	Fluxo volumétrico [Lh ⁻¹ m ⁻²]
G	Irradiação solar global [Wm ⁻²]
ρ	Massa específica [kg m ⁻³]
ρ	Refletividade [-]
R	Resistividade [m ² KW ⁻¹]
q	Taxa de fluxo de calor [W]
q _{abs}	Taxa de fluxo de calor absorvido [W]
T	Temperatura [°C]
T _s	Temperatura da superfície [°C]
T _{int}	Temperatura interna [°C]
\dot{m}	Vazão mássica [kgs ⁻¹]
Q	Vazão volumétrica [m ³ s ⁻¹]
v	Velocidade do escoamento [ms ⁻¹]
v _{uv}	Velocidade horizontal do vento [ms ⁻¹]
V	Volume [m ³]

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	27
1.1 Panorama Energético Brasileiro	27
1.2 Conforto Térmico	29
1.3 Objetivos	30
1.3.1 Inspiração	30
1.3.2 Objetivo Principal	31
1.3.3 Objetivos Específicos	31
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	33
2.1 Sistemas de Refrigeração	33
2.1.1 Compressão Mecânica de Vapor	33
2.1.2 Compressão Térmica de Vapor	34
2.1.3 Refrigeradores Evaporativos	34
2.2 Técnicas de resfriamento evaporativo em coberturas	37
2.2.1 Resfriamento evaporativo sem a utilização de materiais po- rosos	38
2.2.2 Resfriamento evaporativo através de materiais porosos	40
2.2.3 Sumário	42
3 MODELO EXPERIMENTAL	45
3.1 Bancada Experimental	45
3.2 Seção de Testes	49
3.2.1 Trocador de Calor	49
3.2.2 Cobertura	51
3.2.3 Material Poroso	53
3.3 Procedimento Experimental	55
3.3.1 Testes Preliminares (MS/MS - Meio Seco/Meio Seco)	56
3.3.2 Testes Não Evaporativos (MS/SN - Meio Seco/Sem Nada) .	57
3.3.3 Testes Evaporativos (ME/MS - Meio Evaporativo/Meio Seco)	58
3.4 Fator Associado ao Sistema Evaporativo	59
3.5 Caracterização dos Materiais Porosos	60
3.5.1 Condutividade e Resistência Térmica	60
3.5.2 Refletividade e Absortividade	61
3.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV	62
4 VERIFICAÇÃO ANALÍTICA	65
5 RESULTADOS	71
5.1 Teste Preliminar - MS/MS	71
5.2 Testes Não Evaporativos - MS/SN	74

5.3 Testes Evaporativos - ME/MS	80
5.3.1 Análise do Fator Associado ao Sistema de Resfriamento Evaporativo	89
5.3.2 Consumo de Água	93
5.4 Comparação entre as técnicas de resfriamento evaporativo...	99
5.5 Comparação Teórico-Experimental	101
6 CONCLUSÕES	109
6.1 Sugestões para trabalhos futuros	110
REFERÊNCIAS	111
APÊNDICE A - Caracterização dos Materiais Porosos ..	117
APÊNDICE B - Calibração dos Sensores	121
APÊNDICE C - Correção do <i>Off-set</i>	129

1 INTRODUÇÃO

1.1 PANORAMA ENERGÉTICO BRASILEIRO

A energia elétrica é necessária e fundamental para a realização de diversas atividades humanas. Uma das grandes preocupações que se tem atualmente é com o seu uso racional, onde busca-se cada vez mais harmonizar o desenvolvimento econômico e tecnológico com a conservação dos recursos naturais.

Pesquisas realizadas recentemente no Brasil mostraram um aumento da demanda energética no decorrer dos anos nos principais setores da economia. Com relação ao setor residencial, entre os anos 2000 e 2012, esse aumento foi de 1,2 % ao ano (EPE, 2014a). Acerca do consumo energético desse setor, foi feita uma estimativa a partir de dados de anos anteriores. A Figura 1 mostra o consumo final energético, por fonte, para o setor residencial até o ano de 2050, onde se estima que o consumo de energia elétrica aumentará a uma taxa de aproximadamente 2,7 % ao ano (EPE, 2014b).

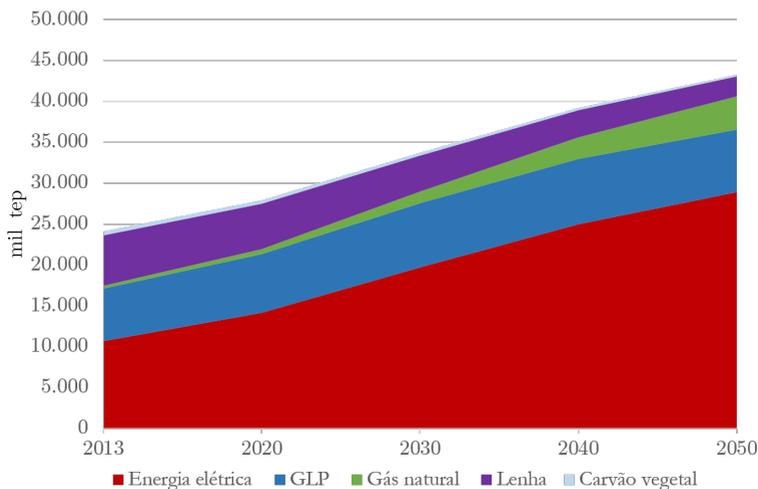


Figura 1 – Consumo final energético, por fonte, pra o setor residencial. Retirado de EPE (2014b)

Ainda com relação à participação da classe residencial no consumo total de energia elétrica do Brasil, de acordo com a última pesquisa neste âmbito realizada pela Eletrobrás, por meio do Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (Procel), foi constatado que 20 % do consumo de energia elétrica em domicílios corresponde ao uso de condicionadores de ar, como mostra a Figura 2. Este valor é ainda maior para o setor comercial, onde o condicionamento ambiental tem a maior participação no consumo de energia elétrica final, sendo esse valor equivalente a 47 % (ELETROBRÁS, 2009).

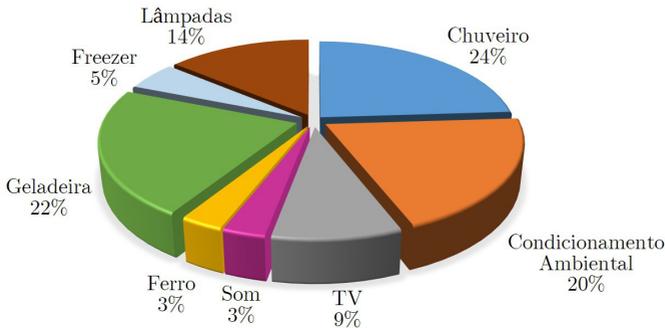


Figura 2 – Participação dos eletrodomésticos mais importantes no consumo médio domiciliar no Brasil. Retirado de Eletrobrás (2009)

Os fatores responsáveis pelo aquecimento de ambientes podem ser classificados como internos e externos. Dentre os fatores internos pode-se citar lâmpadas e equipamentos eletrônicos que dissipam calor. Já os fatores externos estão associados à parcela da radiação emitida pelo sol que é absorvida pelas paredes e coberturas das edificações, sendo transferida para seu interior, o que resulta em um aumento da temperatura da estrutura e conseqüentemente em um maior consumo de energia elétrica pelos condicionadores de ar.

A demanda por energia elétrica aumentará ainda mais no decorrer dos anos, como mostrado acima. Pequenas mudanças de hábito, como por exemplo, a diminuição do uso de condicionadores de ar, pode levar a grandes economias. Porém, para isso, é necessário utilizar alternativas que promovam conforto térmico no interior de edificações, sem consumir energia elétrica, como a aplicação de sistemas de resfriamento passivo em coberturas, como os evaporativos, que serão o foco deste estudo.

1.2 CONFORTO TÉRMICO

O corpo humano pode ser comparado a uma máquina térmica, em que a entrada de energia se dá através da alimentação, e como nas demais é necessário que haja a rejeição de calor para o ambiente, para que o corpo continue operando. Sabe-se que a temperatura média do corpo humano situa-se em torno de 37 °C.

O potencial para que ocorra a transferência de calor é a diferença de temperatura. Quando essa diferença é muito grande, como por exemplo em ambientes frios, o corpo humano geralmente perde mais calor do que gera, causando desconforto. Para ambientes quentes ocorre o contrário, o corpo não consegue dissipar a quantidade de calor que necessita, ocasionando também no desconforto. Com a finalidade de manter temperatura interna constante, o corpo humano possui mecanismos termorreguladores, como o arrepiamento para condições de ambientes frios, e o suor para condições de ambiente quente. Para promover o conforto térmico, o homem também possui os mecanismos instintivos e culturais como em situações de ambiente frio, a colocação de barreiras para a transferência de calor, como roupas grossas e cobertores, e também aumentando a geração de calor interna através da prática de exercícios. Para situações de ambiente quente, procura-se utilizar formas de ventilação, refrescar-se na água e também alojar-se em locais sombreados (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014).

Três fatores estão diretamente ligados ao conforto térmico: a temperatura ambiente (bulbo seco), a umidade relativa, e a velocidade do ar. O principal índice é a temperatura, que possui a faixa para conforto térmico preferível entre as pessoas de 22 e 27 °C. A umidade relativa também possui um efeito importante sobre o conforto térmico, uma vez que essa variável indica a quantidade de calor que o corpo pode dissipar através da evaporação. A velocidade do ar está diretamente ligada a substituição da camada de ar quente e úmido próxima ao corpo por ar fresco, não podendo porém ser muito elevada pois pode ocasionar o efeito contrário, ou seja o desconforto (ÇENGEL; BOLES, 2006).

Dessa forma, o conforto térmico, pode ser definido, conforme a ASHRAE (2005), como um estado de espírito que envolve a satisfação da pessoa com o ambiente a sua volta. Se o balanço de todas as trocas térmicas a que está submetido o corpo humano (convecção, condução, radiação, respiração e evaporação) for nulo e a temperatura da pele e suor estiverem dentro de certos limites pode-se dizer que o homem sente conforto térmico.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Inspiração

O sistema evaporativo proposto neste trabalho, difere-se dos demais por utilizar um material poroso por onde escoará a água a ser evaporada. O que se espera desse material é que, a medida que ocorra a evaporação, ele vá absorvendo a água proveniente do reservatório, reproduzindo um bombeamento passivo e auto regulável. Dessa forma, o transporte de água do sistema depende somente das propriedades intrínsecas do material, como a capilaridade, não necessitando de trabalho mecânico e do uso de energia elétrica para seu funcionamento.

Esse mecanismo foi inspirado em fenômenos biológicos e procura reproduzir o que acontece nas árvores, que absorvem água e sais minerais através da raiz e os transportam até as folhas, que estão metros acima. Esse “bombeamento” pode chegar a alturas de até 115 metros, como ocorre na árvore mais alta do mundo, que de acordo com o *Guinness World Records*, é uma sequoia (*Sequoia sempervirens*) localizada no *Redwood National Park*, na Califórnia, USA.



Figura 3 – Árvore mais alta do mundo. Retirado de *National Geographic*

1.3.2 Objetivo Principal

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar, experimental e teoricamente, a influência da disposição de um sistema resfriamento evaporativo sobre lajes e coberturas na diminuição da carga térmica transferida para o interior das edificações. A evaporação da água ocorrerá através de um material poroso, com características de capilaridade que tornem possível o bombeamento passivo e auto regulável, descrito na seção acima. O sistema ficará exposto a condições reais de radiação solar, umidade relativa, ação do vento e dos demais fatores ambientais.

1.3.3 Objetivos Específicos

Para atingir o objetivo principal desse trabalho, alguns objetivos específicos foram adotados, listados abaixo:

- Revisar na literatura os aspectos fundamentais dos sistemas de resfriamento passivos e evaporativos;
- Projetar e construir um aparato experimental, instrumentado de forma que torne possível o estudo da técnica de resfriamento evaporativo em coberturas;
- Testar diferentes materiais porosos que tornem possível o bombeamento passivo e auto regulável;
- Avaliar o processo de resfriamento evaporativo na redução de cargas térmicas no interior de ambientes;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo é dedicado aos aspectos relacionados ao projeto. Conceitos e definições utilizados na dissertação serão aqui apresentados e discutidos.

2.1 SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

Edificações são diariamente expostas ao calor proveniente do sol, o qual é parcialmente absorvido através de sua estrutura. Para promover conforto térmico em seu interior, principalmente em estações quentes, o uso de condicionadores de ar torna-se necessário. Os sistemas de refrigeração convencionais mais conhecidos são aqueles por compressão mecânica e por compressão térmica de vapor, que serão brevemente descritos abaixo.

Uma alternativa a esses sistema que já vem sendo utilizada, são os refrigeradores evaporativos, onde o baixo consumo de energia, as facilidades de manutenção, instalação e operação são algumas de suas vantagens, além do fato de ser um sistema que não agride o meio ambiente por não utilizar gases que contribuem para o efeito estufa (CAMARGO, 2003).

2.1.1 Compressão Mecânica de Vapor

Atualmente, o ciclo de refrigeração por compressão de vapor é o mais utilizado para sistemas de condicionamento de ar e sua forma ideal consiste em quatro processos: a compressão isoentrópica em um compressor, rejeição de calor a pressão constante em um condensador, estrangulamento em um dispositivo de expansão e a absorção de calor a pressão constante em um evaporador. O ciclo real de compressão a vapor, porém, apresenta ineficiências em algumas dessas etapas e se difere do ciclo ideal principalmente pelas quedas de pressão no evaporador, condensador e nas linhas de conexão, pelo sub-resfriamento e superaquecimento e pelas perdas no compressor. Tais ineficiências exigem um trabalho de compressão maior e conseqüentemente uma maior rejeição de calor do que no ciclo ideal (ÇENGEL; BOLES, 2006). Uma representação esquemática do ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor pode ser vista na Figura 4.

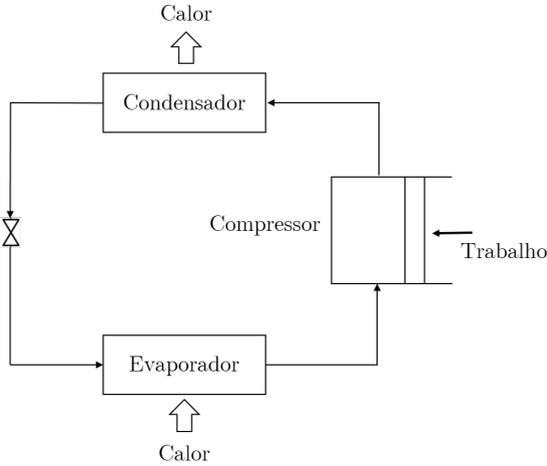


Figura 4 – Representação esquemática do ciclo ideal de refrigeração por compressão de vapor.

2.1.2 Compressão Térmica de Vapor

Sistemas de refrigeração por compressão térmica de vapor, mais conhecidos por sistemas de refrigeração por absorção, são similares aos sistemas de compressão mecânico, porém no lugar do compressor mecânico utiliza-se um termoquímico. O compressor termoquímico é formado por dois principais componentes, o gerador e o absorvedor. A fonte energética do processo de compressão no sistema de refrigeração por absorção é o calor, tornando o custo dessa operação associado com o seu fornecimento. Esses sistemas utilizam pares de fluidos na sua operação, um como refrigerante e um como absorvente, geralmente amônia-água ou água-brometo de lítio (GUMARÃES, 2011). Uma representação esquemática do sistema de refrigeração por absorção pode ser vista na Figura 5.

2.1.3 Refrigeradores Evaporativos

Os equipamentos de resfriamento evaporativo podem ser de refrigeração evaporativa direta (RED) ou de refrigeração evaporativa indireta (REI). O RED está baseado no contato térmico e mecânico entre

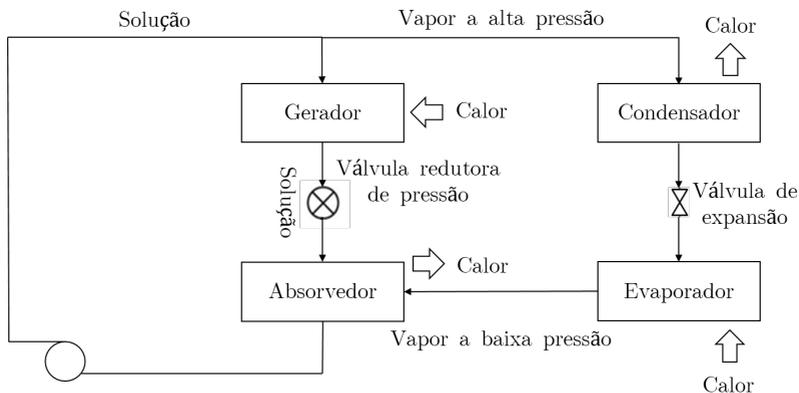


Figura 5 – Representação esquemática do sistema de refrigeração por absorção

a água e o ar. A corrente de ar entra no equipamento enquanto água, na temperatura de bulbo úmido (TBU) do ar de entrada, é aspergida. O calor é transferido a partir da corrente de ar como calor sensível e é absorvido pela água na forma de calor latente, ocasionando a evaporação de parte dessa água. A água que evapora é então incorporada por difusão pela corrente de ar, aumentando seu teor de umidade. A temperatura do ar na saída do sistema é, portanto, menor que a do ar de entrada, embora a entalpia seja aproximadamente a mesma (resfriamento adiabático), devido ao calor latente recuperado no ar na forma de umidade. O esquema do princípio de funcionamento do RED pode ser visto da Figura 6.

No REI não há o contato direto e a transferência de calor e de massa ocorre entre duas correntes de ar separadas por uma superfície, que apresenta um lado umedecido, onde tanto a água quanto o ar, neste caso denominado ar secundário, são refrigerados, e um lado seco onde somente o ar é refrigerado, neste caso denominado ar primário. O ar primário, que será utilizado para condicionar o ambiente, escoava através dos canais secos, transferindo calor através da superfície, o qual é absorvido como calor latente no lado umedecido, pela água, refrigerando o ar secundário evaporativamente pelo mesmo princípio do RED. Esse processo ocorre com a umidade do ar primário constante e com sua entalpia sendo reduzida, em contraste à redução de temperatura adiabática de um refrigerador evaporativo direto (PORUMB et al., 2016).

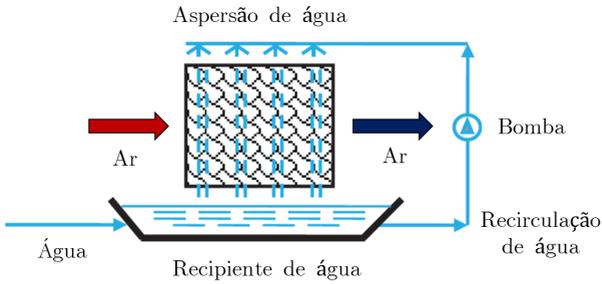


Figura 6 – Esquema do princípio de funcionamento do RED. Retirado de Porumb et al. (2016)

O esquema do princípio de funcionamento de um equipamento de REI pode ser visto da Figura 7.

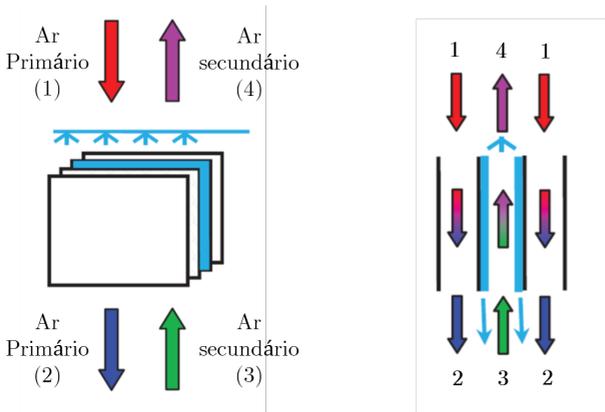


Figura 7 – Esquema do princípio de funcionamento de um equipamento de REI. Retirado de Porumb et al. (2016)

2.2 TÉCNICAS DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO EM COBERTURAS

Atualmente a maioria das lajes e coberturas é construída com materiais que possuem altos e médios valores de absorvidade (coeficientes de absorção) (LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY, 2000), o que os faz absorver grande parcela de calor proveniente da radiação solar, sendo este transferido para o interior das edificações e consequentemente aumentando a demanda de condicionadores de ar, o qual, é uma fonte potencial de economia de energia elétrica.

Uma alternativa para diminuir o consumo energético proveniente do uso de ar condicionados é a disposição de barreiras nas coberturas e/ou paredes as quais impediriam que certa quantidade de energia fosse transferida para dentro das edificações. Às medidas que previnem o aquecimento no interior de ambientes dá-se o nome de resfriamento passivo (GEETHA; VELRAJ, 2012).

Coberturas, janelas, paredes e a orientação da estrutura são as principais considerações no resfriamento passivo de edificações. Contudo, entre esses parâmetros, para edificações horizontais, a cobertura é o que apresenta a maior capacidade para o resfriamento passivo devido à sua grande área superficial exposta ao sol, a qual recebe uma grande parcela de radiação (SABZI et al., 2015). Por esse motivo, muitos estudos tem sido realizados para analisar a viabilidade de sistemas alternativos, em lajes, telhados e coberturas.

Lamberts (1983), avaliou o desempenho térmico de coberturas leves com ático, através da modificação de suas propriedades óticas. Entre as técnicas avaliadas por esse autor pode-se citar a diminuição da emissividade inferior do telhado e a diminuição da absorvância, as quais foram realizadas por meio da adição de uma lamina de alumínio polido e da pintura das telhas com tinta branca, respectivamente. O melhor desempenho térmico foi obtido quando utilizou-se as duas técnicas, em conjunto, na cobertura.

Outra alternativa para diminuir a carga térmica transferida para o interior de edificações, é através da utilização de sistemas de resfriamento evaporativo em coberturas, que vêm sendo objeto de muitos estudos, os quais serão apresentados abaixo.

2.2.1 Resfriamento evaporativo sem a utilização de materiais porosos

Sodha et al. (1980) realizaram uma análise numérica de dois métodos de resfriamento evaporativo sobre coberturas: aspersores de água e a cobertura composta por uma camada de água, denominada "*roof pond*". Foram utilizados dados de radiação solar e temperatura ambiente de um dia típico de verão em Nova Delhi. Os resultados mostraram que, para uma umidade relativa de 80 %, o fluxo de calor transferido para o interior de uma sala, pode ser reduzido em aproximadamente 48 %, quando a cobertura é composta pela *roof pond*, e 41 % quando se utiliza um sistema de aspersores de água.

Al-Turki e Zaki (1991) avaliaram numericamente o efeito da utilização de aspersores de água sobre a cobertura de uma edificação. Os resultados mostraram que esse tipo de resfriamento evaporativo pode reduzir em 40 % a carga de refrigeração para condições de clima quente e seco.

Raeissi e Taheri (1996) desenvolveram um modelo matemático para comparar a carga de refrigeração necessária no interior de edificações compostas por uma cobertura do tipo *roof pond*, por um sistema de sombreamento simples, e por uma cobertura composta pelos dois sistemas mencionados acima. Os resultados mostraram que as demandas por carga de refrigeração, diminuíram em 79,0, 58,1 e 43,6 %, para as residências com a cobertura composta pelos dois sistemas, pela *roof pond* e pelo sistema de sombreamento, respectivamente, em relação à uma cobertura sem nenhum tratamento.

Estudos como os realizados por Nahar, Sharma e Purohit (1999), Nahar, Sharma e Purohit (2003) e Amer (2006) mostraram que, entre as técnicas de resfriamento passivo conhecidas, o resfriamento evaporativo, é o que apresenta a melhor performance no que se refere à diminuição de temperatura e fluxos de calor.

Rincón, Almas e González (2001) construíram um sistema de resfriamento passivo sobre a cobertura de uma célula de testes constituído por um *roof pond* coberto por dois painéis de poliestireno, revestidos com fibra de vidro. O sistema proposto conseguiu diminuir em até 8 °C a temperatura da célula de testes com o sistema se comparada àquela sem esse sistema.

Cheikh e Bouchair (2004) desenvolveram um modelo matemático para um telhado evapo-reflexivo, a fim de diminuir a necessidade de refrigeração em ambientes internos de edifícios localizados em condições de clima árido quente. Os resultados mostraram que a aplicação do

sistema evapo-reflexivo em telhados reduz significativamente a carga térmica no interior de ambientes se comparadas a um telhado sem esse sistema. Pode-se verificar também que combinando o telhado evapo-refletivo com a ventilação noturna esse resfriamento torna-se ainda mais significativo.

Belarbi, Ghiaus e Allard (2006) desenvolveram um sistema de aspersão de água, o qual foi implementado em um protótipo, com o objetivo de promover resfriamento passivo em seu interior. Os resultados indicaram que quando a temperatura ambiente fica em torno de 33 °C, a temperatura interna do protótipo não ultrapassa os 27 °C, com um consumo de água de 10 Lh⁻¹.

Teixeira e Labaki (2006) realizaram um estudo de caso em duas células experimentais, sob condições reais de clima tropical. Para verificar os efeitos do resfriamento evaporativo foram instalados aspersores de água sobre uma das células experimentais, enquanto a outra, serviu como referência. Observou-se uma melhor performance da célula experimental cuja cobertura era composta pelo sistema evaporativo, o que pôde ser comprovado pela diferença significativa na temperatura da superfície interna da laje, mesmo quando a aspersão de água ocorreu em pequenos intervalos de tempo.

Em continuidade ao estudo numérico, um estudo experimental foi realizado por Cheikh e Bouchair (2008), onde duas células experimentais idênticas foram construídas, sendo a cobertura de uma delas formada pelo telhado evapo-reflexivo enquanto a outra era constituída somente pela placa de alumínio, que serviu como referência. Os resultados mostraram que o telhado evapo-reflexivo pode reduzir a temperatura interna do ar de 6 a 10 °C. O desempenho do sistema pode ser melhorado quando se permitiu a ventilação noturna na célula experimental, onde a temperatura interna do ar ficou de 2 a 3 °C menor.

Teixeira e Labaki (2014), aumentaram a escala de seus experimentos, utilizando a cobertura de uma casa, a qual foi dividida em três partes, das quais duas receberam revestimentos passivos sobre as telhas, tinta impermeável e tinta acrílica, ambas na cor branca. A terceira parte, usada como referência, foi coberta por telhas sem nenhum tratamento. Micro aspersores de água foram fixados na superfície superior das telhas que receberam os revestimentos. Os resultados mostraram que, quando se alcançou o valor máximo de radiação solar e de temperatura da superfície, a maior diferença de temperatura entre a parte com o tratamento e a de referência foi para o telhado revestido com a tinta acrílica. Isso mostra que entre os tratamentos estudados, esse tipo é o mais indicado quando a finalidade é o resfriamento

passivo de coberturas. Para melhores resultados é possível combinar esse revestimento com a aspersão d'água mostrando dessa forma que o resfriamento evaporativo associado a revestimentos passivos, torna-se efetivo na diminuição de temperaturas de coberturas.

2.2.2 Resfriamento evaporativo através de materiais porosos

Ghosal, Tiwari e Srivastava (2003) desenvolveram um sistema evaporativo, o qual teve sua performance térmica avaliada teórica e experimentalmente. Para isso, foi utilizada uma célula de testes exposta a condições reais ambientais de Delhi, Índia. O sistema proposto é constituído por uma série de canos e bombas, os quais levam água até o topo da cobertura. O escoamento de água ocorre por meio das propriedades porosas de um tecido, disposto sobre a cobertura e parede da estufa. Os resultados mostraram que a temperatura interna da célula de testes pode ser reduzida em 6 °C quando utiliza-se o escoamento de água através do tecido e 2 °C quando utiliza-se somente o tecido seco sobre a célula de testes, se comparados à célula de testes de referência, ou seja, sem nenhum tratamento.

Meng e Hu (2005) propuseram um modelo matemático utilizando um meio poroso umedecido sobre uma cobertura para avaliar os efeitos térmicos do resfriamento evaporativo. Os resultados mostraram que a temperatura interna pode ser reduzida em média 5 °C, quando uma camada porosa é disposta sobre a cobertura, se comparada a uma cobertura sem a camada.

Wanphen e Nagano (2009) propuseram uma alternativa sustentável para moderar a temperatura de telhados e coberturas utilizando as propriedades de materiais porosos. Os resultados mostraram que a evaporação nos materiais porosos implicou uma melhor redução de temperatura da superfície em comparação a materiais de cobertura convencionais e obteve uma performance similar a do *sedum*, uma espécie de planta utilizada em telhados verdes.

Pires, Silva e Gomes (2011) determinaram experimentalmente a capacidade de resfriamento evaporativo de diferentes materiais. Para isso, foi utilizado um pequeno túnel de vento, onde onze diferentes amostras, seis de materiais utilizados na construção civil e cinco de materiais têxteis, foram submetidas a testes de absorção e evaporação d'água. Os resultados mostraram que os materiais têxteis, em geral, apresentam a melhor performance, ou seja uma boa absorção da água associada a uma rápida evaporação.

Crawford et al. (2013) estudaram a habilidade que um sistema evaporativo, com bombeamento passivo possui em bloquear fluxos térmicos provenientes de uma fonte que dissipa calor a uma taxa constante. Para isso, foi construído um aparato experimental, em que uma membrana porosa foi disposta sobre um prato de cobre, o qual simula a cobertura. Os resultados mostraram que para um fluxo de calor de 2220 Wm^{-2} , a aplicação desse sistema de resfriamento evaporativo diminuiu em até $28 \text{ }^\circ\text{C}$ a temperatura da superfície, se comparada à uma cobertura resfriada apenas pela convecção natural.

Crawford e da Silva (2014) estudaram a capacidade que um sistema de bombeamento passivo e auto regulável, baseado em evaporação, possui em bloquear fluxos de energia que entram nas edificações através da sua cobertura. Para isso, foi construído um aparato experimental, em que um prato de cobre foi utilizado para simular a cobertura sobre a qual foi disposta uma membrana porosa, a qual era continuamente umedecida com água, à medida que ocorria a evaporação. A seção de testes utilizada no trabalho pode ser vista na Figura 8.

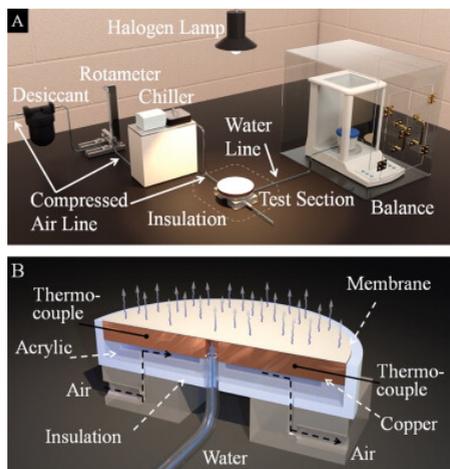


Figura 8 – a) Principais componentes do sistema evaporativo. b) Corte transversal da seção de testes. Retirado de Crawford e da Silva (2014)

Os resultados mostraram que a membrana evaporativa necessitou de uma menor carga de refrigeração quando a temperatura do prato ficou acima de $24 \text{ }^\circ\text{C}$, enquanto a membrana seca obteve uma melhor performance para temperaturas menores que essa. Também foi observado que a temperatura do prato de cobre ficou consideravel-

mente menor quando se utilizou a membrana evaporativa se comparada a membrana seca e aos resultados simulados para o EPDM (*Ethylene Propylene Diene Monomer*), uma borracha sintética, amplamente utilizada sobre coberturas nos Estados Unidos e em outros lugares do mundo.

Kuehni et al. (2016) avaliaram experimentalmente o desempenho térmico da secagem de meios porosos com diferentes tamanhos de partículas na diminuição da temperatura da superfície de coberturas e na redução de fluxos de calor, através da evaporação. Os resultados mostraram que a aplicação da secagem de meios porosos diminuiu em aproximadamente 5 °C a temperatura da superfície, reproduzida em laboratório.

2.2.3 Sumário

A Tabela 1 sumariza os trabalhos selecionados apresentados nas seções acima. Pode-se observar que a técnica de resfriamento evaporativo, através da disposição de um material poroso sobre a cobertura, em condições reais ambientais (*outdoor*), foi estudada somente por Ghosal, Tiwari e Srivastava (2003). Porém, esses autores utilizam trabalho mecânico no transporte de água até o material poroso, diferindo do presente trabalho, onde o bombeamento de água para o material poroso é realizado através de seu poder capilar, de maneira passiva e auto regulável.

Com isso, pode-se perceber que ainda não existe na literatura um estudo em que o resfriamento evaporativo é realizado através da disposição de um material poroso sobre a cobertura, com bombeamento passivo e auto regulável em condições reais ambientais (*outdoor*), que é o foco desse estudo.

Tabela 1 – Sumário dos trabalhos selecionados

Autor	Solução		Ambiente		Resfriamento Evaporativo	
	Teórica	Experimental	Indoor	Outdoor	Sem Meio Poroso	Com Meio Poroso
Sodha et al. (1980)	X				X	
Al-Turki e Zaki (1991)	X				X	
Raeissi e Taheri (1996)	X				X	
Nahar, Sharma e Purohit (1999)		X		X	X	
Rincón, Almaso e González (2001)		X		X	X	
Nahar, Sharma e Purohit (2003)		X		X	X	
Ghosal, Tiwari e Srivastava (2003)	X	X		X		X
Cheikh e Bouchair (2004)	X				X	
Meng e Hu (2005)	X					X
Amer (2006)		X		X	X	
Belarbi, Ghiaus e Allard (2006)	X	X		X	X	
Teixeira e Labaki (2006)		X		X	X	
Cheikh e Bouchair (2008)		X		X	X	
Wauphen e Nagano (2009)	X	X			X	X
Pires, Silva e Gomes (2011)		X			X	X
Teixeira e Labaki (2014)		X		X	X	
Crawford et al. (2013)		X		X		X
Crawford e da Silva (2014)		X		X		X
Knehi et al. (2016)		X		X		X

3 MODELO EXPERIMENTAL

O objetivo principal deste trabalho é avaliar os efeitos da aplicação de um sistema de resfriamento evaporativo na transferência de calor direcionada ao interior das edificações através de sua cobertura.

Para isso foi necessário construir e instrumentar devidamente um aparato experimental, em que o sistema evaporativo proposto foi estudado através de uma seção de testes, constituída pelo material poroso, o qual funciona como a superfície por onde ocorrerá a evaporação, pela cobertura, e por um trocador de calor, que serão descritos neste capítulo.

Para se obter dados climáticos do ambiente onde se localiza o aparato experimental e para refrigerar o fluido utilizado para retirar calor da seção de testes, foi necessária a instalação de alguns equipamentos, os quais também serão descritos neste capítulo.

3.1 BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada experimental foi exposta a condições reais ambientais, situada sobre uma estrutura metálica de 1,2 m de altura, no terraço do LEPTEN/LabSolar (Laboratório de Energia Solar), da Universidade Federal de Santa Catarina, localizado à latitude 27,6047 sul e longitude 48,5227 oeste, mesmo local onde existe uma estação solarimétrica de superfície no contexto do projeto BSRN (*Baseline Surface Radiation Network*)/WMO (*World Meteorological Organization*).

Dois Banhos Termocriostáticos da marca Microquímica Equipamentos, modelo MQBMP-01, com capacidade de bombeamento de 4 Lmin^{-1} foram conectados em série à seção de testes. Esse tipo de conexão foi necessária para poder atingir a temperatura de entrada da água, fixada em $22 \text{ }^\circ\text{C}$. Esse valor foi estimado para uma temperatura média da laje para edifícios condicionados. A Figura 9 mostra um esquema do sistema utilizado para refrigerar a seção de testes. O primeiro banho da série, representado na Figura 9 por A, serviu como um trocador de calor auxiliar, ao qual foi introduzido uma serpentina de cobre, por onde passa a água que sai da seção de testes, fazendo com que chegue mais fria ao segundo banho, representado na Figura 9 por B. Quando o sistema alcança o regime permanente, a temperatura da água no banho B permanece constante, entrando refrigerada na seção de testes, a uma vazão de $1,95 \text{ Lmin}^{-1}$. Para manter essa vazão

d'água, foi realizado um *bypass* para que parte da água retornasse ao banho sem passar pela seção de testes.

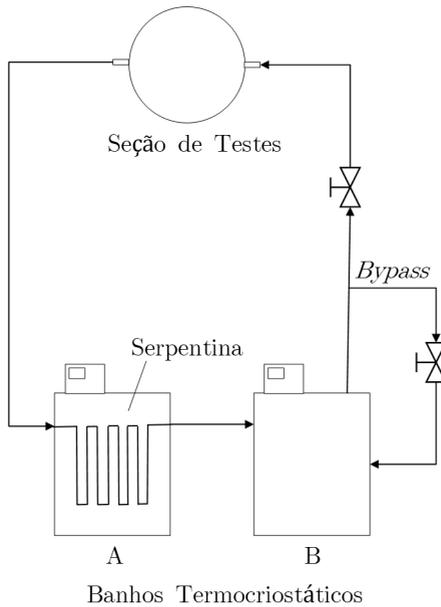


Figura 9 – Representação esquemática do sistema utilizado para refrigerar a seção de testes

Para medir a temperatura da água na entrada e na saída da seção de testes, dois termopares tipo E, da marca OMEGA, foram utilizados, os quais foram calibrados a partir do bloco calibrador CL 134 também da marca OMEGA. Os dados obtidos na calibração podem ser vistos no Apêndice B.2.

A velocidade do ar, foi medida por um Anemômetro Ultrassônico, modelo 81000 da marca Young, direcionado para o norte, conforme especificações técnicas do fabricante, que obtém dados do módulo da velocidade do ar e os ângulos de direção do vento, azimutal e de elevação. A direção do vento utilizada no presente trabalho é a horizontal (xy), calculada através da Equação 3.1

$$v_{xy} = v \cos(\beta), \quad (3.1)$$

onde v é o módulo da velocidade do vento e β é o ângulo de elevação.

A irradiação solar global, foi medida por um Piranômetro, modelo CMP21/ PT100 da marca Kipp & Zonen.

A temperatura ambiente foi medida através de um RTD, tipo PT100, da marca OMEGA, modelo F1540-100-1/3B-100, calibrado com os demais termorresistores, protegido por uma *Plate Radiation Shield*, dispositivo que não permite a incidência da radiação solar direta sobre o sensor, e que é ventilado naturalmente.

O sistema evaporativo começou a operar quando o meio poroso foi conectado a um reservatório de água, através de uma mangueira de poliuretano, de 4 e 6 mm de diâmetro interno e externo respectivamente. O reservatório está situado sobre uma balança marca Marte, modelo AD 5002, com capacidade máxima para 5010 g, a qual envia dados da massa automaticamente a um computador. Para prevenir perdas de massa da água por evaporação no reservatório, o mesmo foi coberto, deixando-se apenas um pequeno orifício na tampa para manter a pressão atmosférica.

O nível d'água no reservatório fica à mesma altura da superfície superior do meio poroso. Para evitar-se erros de medição na balança devido à ação do vento, o sistema balança-reservatório foi envolto por uma estrutura de madeira com tampa.

Os dados de temperatura, fluxo de calor, radiação solar, velocidade e direção do vento foram adquiridos a cada quinze segundos, através da unidade de aquisição modelo 34972A, da marca Agilent Technologies. A perda de massa por evaporação, obtida através da balança, também é adquirida a cada quinze segundos, através de um *notebook*, marca Acer. Os valores de umidade relativa foram retirados da estação BSRN, através do site <http://notus.lepten.ufsc.br>. A Tabela 2 apresenta os valores das incertezas de medição relacionadas aos equipamentos mencionados nesta seção.

A Figura 10 mostra uma representação esquemática da bancada experimental.

Tabela 2 – Incertezas de medição relacionadas aos equipamentos presentes no aparato experimental

Equipamento	Variável Medida	Incerteza de Medição
Termopar Tipo E	Temperatura	$\pm 0,67^\circ\text{C}$
Anemômetro Ultrassônico	Velocidade do Ar	$\pm 0,05\text{ m s}^{-1}$
Anemômetro Ultrassônico	Direção do Vento	$\pm 2^\circ$
Balança de Precisão	Massa de água	$\pm 0,003\text{ g}$

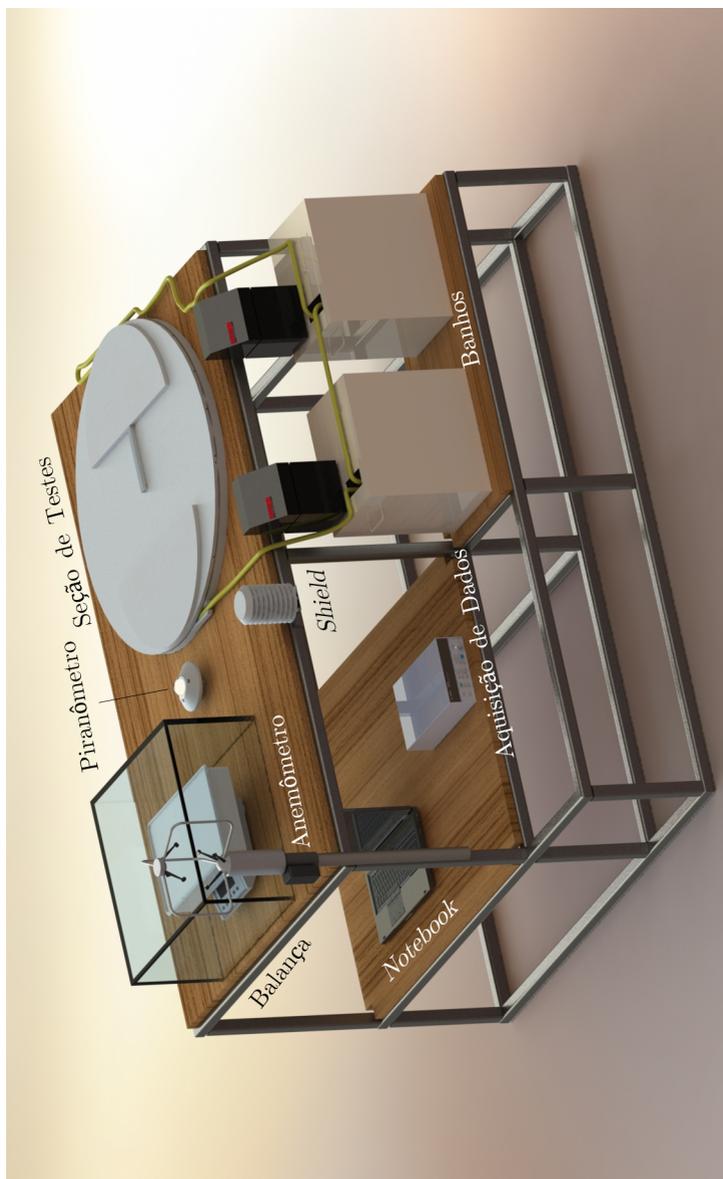


Figura 10 – Representação esquemática da bancada experimental

3.2 SEÇÃO DE TESTES

A seção de testes é composta por três elementos, o trocador de calor, a cobertura, e o material poroso. O trocador de calor, situado na parte inferior, foi fabricado a partir de três materiais, uma placa de alumínio, e duas de polipropileno. A cobertura, localizada entre o trocador de calor e o meio poroso, foi produzida a partir de uma placa de polipropileno. Na parte superior, localiza-se o material poroso, disposto de acordo com o teste a ser realizado. Os elementos que compõe a seção de testes serão detalhados abaixo.

3.2.1 Trocador de Calor

Com o intuito de manter uma temperatura homogênea no interior da seção de testes, para poder realizar as medições através dos transdutores de fluxo de calor, à temperatura constante, foi construído um trocador de calor em formato espiral. Essa configuração foi necessária para que fosse mantida uma temperatura média entre o par de canais d'água e conseqüentemente ao longo de toda a estrutura do trocador.

A etapas de montagem do trocador de calor podem ser vistas na Figura 11 e serão descritas abaixo.

Para fabricar o trocador foram utilizados três discos de um metro de diâmetro cada, sendo um deles de alumínio, liga Naval 5052 F, com um quarto de polegada de espessura e os demais de polipropileno, um com 15 mm e outro com 10 mm de espessura.

Nos três discos foram realizados 138 furos passantes de 4,1 mm de diâmetro distribuídos ao longo de suas áreas, para posicionar os parafusos, além do furo de 25,4 mm de diâmetro, localizado na posição central. Estes furos encontram-se exatamente na mesma posição em cada um dos discos, para que pudessem coincidir no momento da montagem.

Para fabricar a parte espiral, ou seja, os canais d'água, que possuem 20 mm de largura, o disco de polipropileno de maior espessura foi usinado, no formato proposto, com paredes principais de 10 mm e paredes centrais entre o par de canais com 5 mm de largura. Os furos para os parafusos foram realizados na parede de 10 mm de largura. Toda a usinagem foi realizada com máquina de corte à jato d'água.

Para formar o trocador de calor, após cada um dos discos passarem pelo processo de usinagem e chegarem na forma desejada, estes

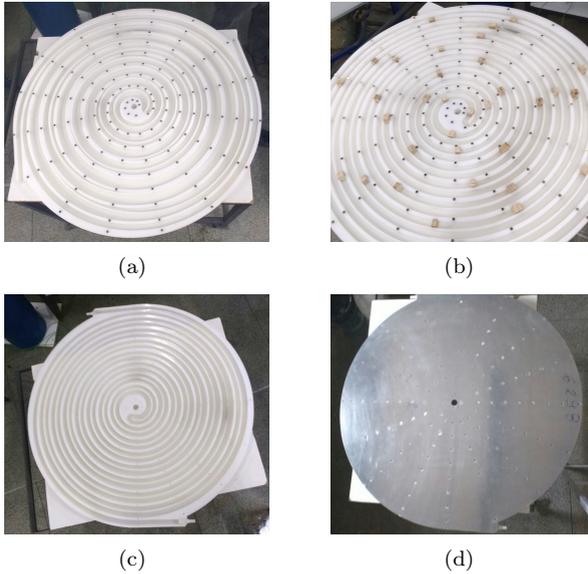


Figura 11 – Etapas da montagem do trocador de calor espiral

foram sobrepostos e fixados com parafusos. Como pode ser visto na Figura 12, na parte superior, posicionou-se o disco de alumínio, na parte central a peça de polipropileno em formato espiral, e na parte inferior o disco de polipropileno de 10 mm de espessura.

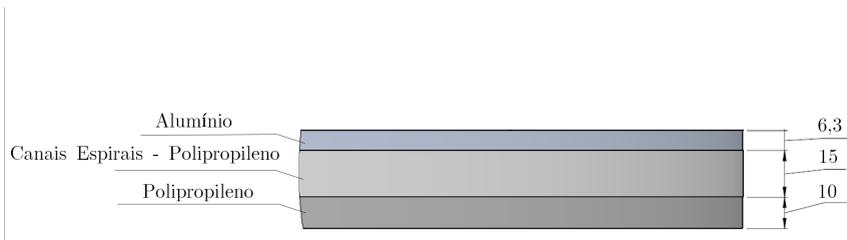


Figura 12 – Representação esquemática da vista lateral do trocador de calor

Na primeira etapa da montagem, fixou-se a parte em espiral ao disco de polipropileno de 10 mm de espessura, que seria a superfície inferior do trocador. A parede principal da peça em espiral foi fixada com cola do tipo silicone e aparafusada ao disco de polipropileno (Fi-

gura 11a). Por possuir uma pequena largura, a parede central foi somente colada, e não aparafusada, à placa de polipropileno (Figura 11b).

Na segunda etapa da montagem houve a fixação do disco de alumínio à parte do trocador já colada na primeira etapa (Figura 11c). Em seguida posicionou-se o disco de alumínio na parte superior da peça, com silicone entre as partes a serem coladas, e aparafusou-se, agora a peça completa com as três partes (Figura 11d).

A cabeça de todos os parafusos foi lixada para que a superfície superior do trocador não apresentasse rugosidades. A capacidade total de volume de água que o trocador de calor possui é de 10,09 litros.

3.2.2 Cobertura

Para definir o material que reproduziria uma cobertura do tipo laje, a qual se localiza sobre o trocador, utilizou-se o conceito de resistência térmica associada à condução de calor, que pode ser definida como a razão entre um potencial motriz (diferença de temperatura) e a correspondente taxa de transferência de calor, e que para uma parede plana é representada por:

$$R_{t,cond} = \frac{\delta}{kA} \quad (3.2)$$

onde δ é a espessura da parede, k é a condutividade térmica do material, e A é a área da parede normal à direção da transferência de calor.

O concreto é um material de uso comum na construção de lajes e coberturas, sendo sua condutividade térmica dependente de sua composição. O tipo normal é composto por pedras onde sua condutividade é em torno de $1,75 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). No Brasil, os projetos para estruturas de concreto seguem alguns requisitos básicos e o valor da espessura mínima de uma laje maciça é um deles, o qual é de 10 cm para laje em balanço e de 7 cm para laje não em balanço conforme estabelecido pela norma técnica NBR 6118 “Projeto de estruturas de concreto - Procedimento”.

Calculou-se dessa forma a resistência térmica por unidade de área, considerando uma laje para cobertura não em balanço de concreto com agregados de pedra normal com 7 cm de espessura.

$$R''_{t,cond} = \frac{0,07}{1,75} = 0,04 \frac{m^2K}{W} \quad (3.3)$$

Por ser um material leve, de fácil manuseio e usinagem, o polipropileno ($k = 0,25 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) foi selecionado para reproduzir a laje da cobertura descrita acima. Para que fosse mantido o mesmo valor de resistência térmica da referida laje ($R''_{t,cond} = 0,04 \text{ m}^2 \text{ KW}^{-1}$) foi utilizado um disco de polipropileno com espessura de 0,01 m.

Os dados de temperatura interna da cobertura foram adquiridos por meio de dez termorresistores, também conhecidos como RTDs (*Resistance Temperature Detector*), do tipo PT100, da marca OMEGA, modelo F1540-100-1/3B-100. Os sensores foram calibrados a partir do bloco calibrador CL 134 da marca OMEGA, cuja incerteza gerada é de $\pm 0,05 \text{ }^\circ\text{C}$. A incerteza de medição combinada para os termorresistores é de $\pm 0,08 \text{ }^\circ\text{C}$, e pode ser vista juntamente com a curva de calibração dos termorresistores no Apêndice B.1 .

Cinco transdutores de fluxo de calor a gradiente tangencial, quatro deles com dimensões 5,5 x 5,5 cm e um deles com dimensões 4,5 x 4,5 foram utilizados para mensurar o fluxo de calor transferido para o interior do seção de testes, através da cobertura, os quais foram construídos e calibrados no Laboratório de Meios Porosos e Propriedade Termofísicas (LMPT), da Universidade Federal de Santa Catarina. A incerteza de medição do transdutor é de $\pm 1 \%$ (GÜTHS et al., 1995). A curva e as constantes de calibração para os transdutores encontram-se no Apêndice B.3.

A superfície interna do polipropileno utilizado como cobertura foi usinada, por fresamento, para que os termorresistores e transdutores de fluxo de calor fossem instalados. Os canais para disposições dos sensores e dos cabos que os ligam ao sistema de aquisição de dados, possuem 3 mm de profundidade e 6,04 mm de largura, exceto os para a disposição dos fluxímetros de calor os quais foram realizados rebaixos quadrados de 5,5 cm de lado

Para auxiliar a condução de calor entre o trocador e a cobertura, um quilo de pasta térmica, da marca Simavi, foi aplicada em toda a superfície inferior do polipropileno, inclusive sobre os sensores.

A Figura 13 mostra a disposição dos sensores e a localização, em relação ao centro do disco, na parte inferior da cobertura, onde os prefixos T e F referem-se respectivamente aos termorresistores e transdutores de fluxo de calor.

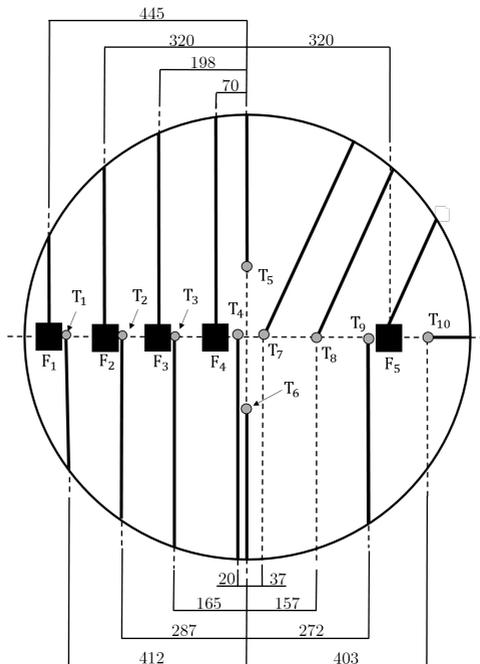


Figura 13 – Posicionamento dos termorresistores e transdutores presentes na parte inferior da cobertura

3.2.3 Material Poroso

Para reproduzir o sistema evaporativo proposto, é necessário dispor um material poroso sobre a cobertura, pelo qual escoará a água a ser evaporada. O material precisa se manter constantemente umedecido, o que para este trabalho, acontece por meio de uma mangueira conectada a um reservatório de água. Um dos objetivos desse estudo é a não utilização de trabalho mecânico no bombeamento da água que vai do reservatório para o meio poroso. Para isso, foi necessário encontrar um material que tenha alto poder capilar, ou seja, que consiga absorver a água e bombeá-la por toda a sua superfície.

Como mencionado no Capítulo 1, a ideia de encontrar um material com essa propriedade foi inspirada em mecanismos naturais, e surgiu das árvores, que conseguem levar água e sais mineiras das raízes

até as folhas, à medida que realizam a fotossíntese. O que se espera do material poroso é que à medida que a água evapora em sua superfície, ele vá absorvendo a água proveniente do reservatório, reproduzindo dessa forma um bombeamento passivo e auto regulável.

Foram utilizados dois materiais com as características descritas acima: placas de fibra cerâmica utilizadas na prevenção de perdas térmicas em equipamentos, comercialmente conhecidas como *Thermalboard HO* e tecido de algodão, utilizado na confecção de vestuários, ambos materiais na cor branca.

As placas de fibra cerâmica foram encontradas em duas espessuras, 13 e 6 mm, enquanto o tecido utilizado apresenta 0,4 mm de espessura. Os materiais foram cortados em formato de semidisco, o material de fibra cerâmica em semidiscos de 1000 mm e 610 mm de diâmetro e o tecido apenas em semidisco de 610 mm de diâmetro.

As Figuras 14 e 15 mostram os detalhes da seção de testes, sem a presença do material poroso, o qual é disposto na cobertura de acordo com o teste a ser realizado, como será visto na Seção 3.3.

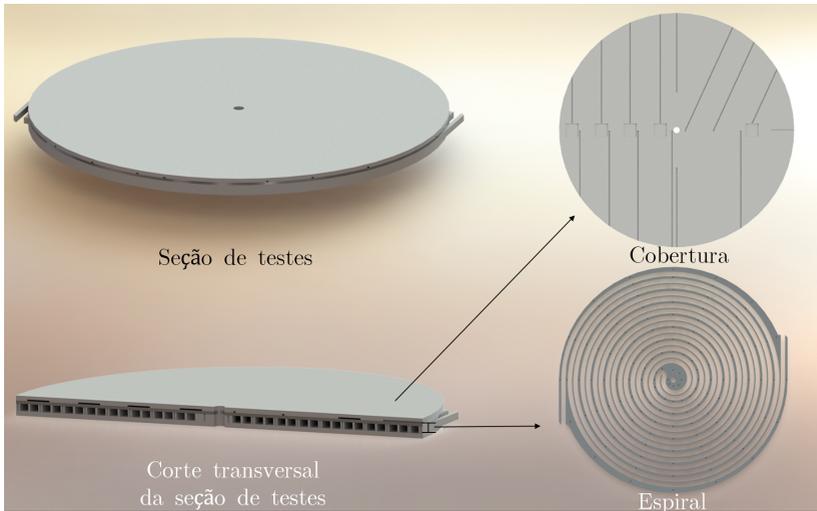


Figura 14 – Representação esquemática e corte transversal da seção de testes. Detalhe da superfície inferior da cobertura e da parte espiral do trocador de calor

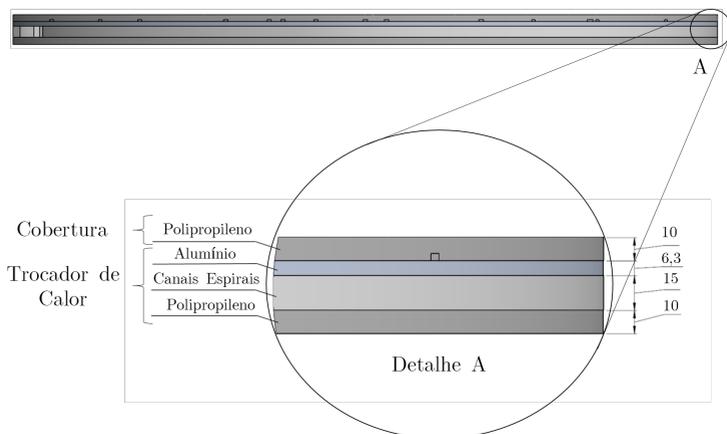


Figura 15 – Detalhes da seção de testes

3.3 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Para realizar uma análise comparativa entre o desempenho térmico da cobertura que possui o sistema de resfriamento evaporativo e àquela que não o possui, foram realizados diferentes testes, com diferentes valores de diâmetro e espessura do material poroso.

Pelo fato de os testes serem realizados em condições reais ambientais, os valores da radiação solar, umidade relativa, velocidade do vento e temperatura ambiente variam ao longo do dia, não existindo dois dias sob as mesmas condições. A alternativa encontrada para que se pudesse comparar a performance térmica entre uma cobertura que possui um sistema de resfriamento passivo e aquela que não o possui, foi utilizar um lado da seção de testes como referência, ou seja sem a disposição do sistema passivo a ser testado, e o outro lado composto pelo sistema de resfriamento passivo.

Por esse motivo, os materiais porosos dispostos sobre a cobertura apresentavam formato de semidisco.

Todos os testes foram realizados entre os meses de novembro de 2016 e janeiro de 2017, em dias típicos de verão, na cidade de Florianópolis, estado de Santa Catarina, com a temperatura de entrada da água no trocador de calor fixada em 22 °C.

Os sensores de temperatura T_5 e de fluxo de calor F_4 , apresentaram problemas e por esse motivo não serão mencionados na metodologia

e nos resultados a partir desse ponto.

Todos os valores de temperatura e fluxo de calor já estão corrigidos de acordo com a calibração realizada em cada sensor, apresentadas nos Apêndices desse trabalho. Houve a correção de *off-set* para todos os termorresistores utilizados nos testes descritos abaixo. O procedimento utilizado e o fator de correção são apresentados no Apêndice C.

Os procedimentos descritos abaixo foram denominados com siglas para melhor entendimento, as quais significam que a cobertura está composta por:

- MS = Meio Poroso Seco;
- ME = Meio Poroso Evaporativo;
- SN = Sem Nada.

3.3.1 Testes Preliminares (MS/MS - Meio Seco/Meio Seco)

O teste MS/MS, foi realizado com ambos lados da cobertura sob o material poroso seco, e teve como objetivo verificar o comportamento dos sensores ao longo dos experimentos. Para isso, os dois semidiscos de material poroso com 1000 mm de diâmetro e 13 mm de espessura, secos (sem o bombeamento de água), foram dispostos em ambos lados da cobertura, sem permitir que nenhuma parte dela ficasse exposta ao ambiente, como pode ser visto na Figura 16.

Todos os sensores em funcionamento participaram desse teste.

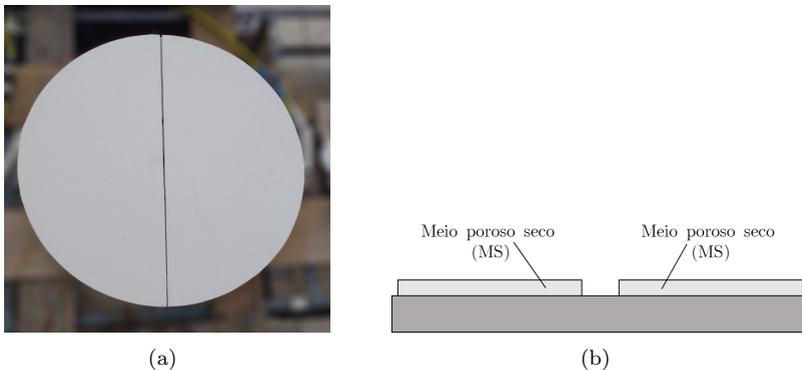


Figura 16 – Seção de testes e representação esquemática para o teste preliminar (MS/MS)

3.3.2 Testes Não Evaporativos (MS/SN - Meio Seco/Sem Nada)

A adição de um material sobre uma cobertura, pode aumentar a resistência térmica do sistema, sendo também considerado um método de resfriamento passivo. Por esse motivo, previamente à realização dos testes evaporativos, foi necessário avaliar a interferência da resistência térmica adicionada ao sistema, por meio da disposição do meio poroso seco sobre a cobertura.

Para isso foram realizados testes onde parte da cobertura ficou exposta ao ambiente (SN), servindo como referência, e parte ficou sob o semidisco de meio poroso seco (MS). A Tabela 3 mostra as dimensões dos materiais utilizados nesse teste, todos eles em formato de semidisco.

Tabela 3 – Dimensões dos materiais porosos utilizados nos testes MS/SN

Material	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)
Fibra Cerâmica	13,0	1000
Fibra Cerâmica	6,0	610
Tecido de Algodão	0,4	610

A Figura 17a mostra a seção de testes para o experimento MS/SN, realizado com o material de 13 mm, e a Figura 17b mostra uma representação esquemática dos testes MS/SN.

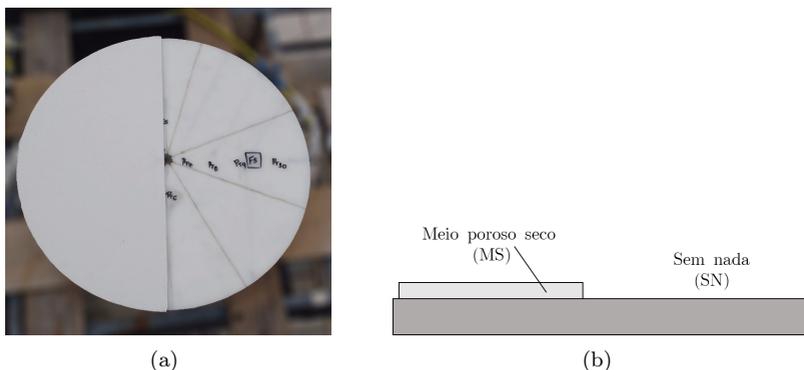


Figura 17 – Seção de testes e representação esquemática dos experimentos não evaporativos (MS/SN)

No teste com o material de 1000 mm de diâmetro e 13 mm de espessura, o meio poroso seco foi disposto sobre a parte da cobertura

composta pelos termorresistores T_1 , T_2 e T_3 e pelos transdutores F_1 , F_2 e F_3 , enquanto a parte da cobertura exposta ao ambiente era formada pelos sensores T_8 , T_9 , T_{10} e F_5 . Os sensores de temperatura T_4 , T_6 e T_7 encontravam-se no limite entre as duas partes e por esse motivo os resultados obtidos através deles não serão apresentados.

Já nos testes com o semidisco de 610 mm de diâmetro, os materiais secos ficaram dispostos sobre a parte da cobertura composta pelos termorresistores T_1 e T_2 e pelos transdutores F_1 e F_2 , enquanto a parte exposta ao ambiente, utilizada como referência, foi monitorada pelos sensores T_9 , T_{10} e F_5 .

3.3.3 Testes Evaporativos (ME/MS - Meio Evaporativo/Meio Seco)

Os testes evaporativos ocorreram quando o reservatório contendo água da torneira foi conectado ao material poroso através de uma mangueira localizada na região central da seção de testes. O material a ser umedecido se encontra disposto na extremidade da seção. Como o reservatório e a mangueira estão exatamente no mesmo nível, foi necessário construir um caminho para que a água chegasse do centro da seção de teste ao material. Para isso foi utilizado um pedaço retangular do material de fibra cerâmica com 13 mm de espessura, o qual foi colocado sobre a mangueira, absorvendo a água e levando-a, passivamente, até o meio poroso em questão. O material poroso ficou completamente umedecido. Durante os testes ME/MS em nenhum momento houve a secagem do meio evaporativo.

A Figura 18a apresenta a seção de testes para os teste evaporativo (ME/MS) com o material poroso de 13 mm, enquanto a Figura 18b mostra uma representação esquemática dos testes evaporativos.

Nos testes não evaporativos verificou-se a performance dos materiais selecionados, em reduzir os fluxos de calor que são transferidos para o interior da cobertura, e a referência utilizada foi a parte da cobertura exposta ao ambiente. Nessa sequência de testes, a referência utilizada foi o meio poroso seco, com a mesma espessura do meio poroso a ser umedecido pelo reservatório.

Os testes evaporativos ocorreram então com parte da cobertura sob o material poroso umedecido, ou seja, o meio poroso evaporativo (ME) e a outra parte coberta pelo meio poroso seco (MS).

A Tabela 4 mostra as dimensões dos materiais porosos utilizados nos testes ME/MS, todos eles em formato de semidisco.

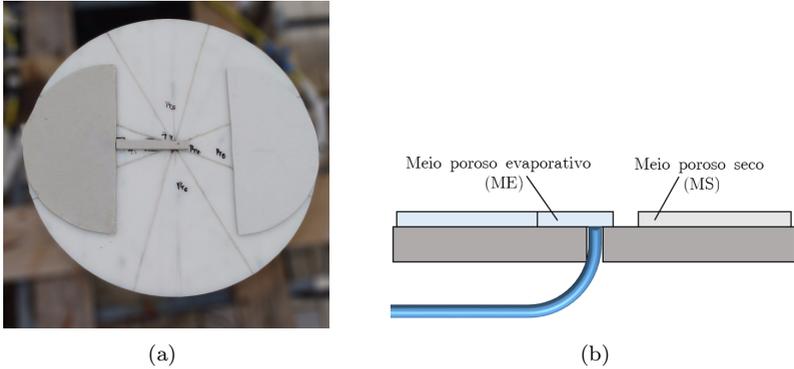


Figura 18 – Seção de testes e representação esquemática para os experimentos evaporativos (ME/MS)

Tabela 4 – Dimensões dos materiais porosos utilizados nos testes ME/MS

Material	Espessura (mm)	Diâmetro (mm)
Fibra Cerâmica	13,0	610
Fibra Cerâmica	6,0	610
Tecido de Algodão	0,4	610

A parte da cobertura composta pelo material poroso evaporativo (ME) foi monitorada pelos termorresistores T_1 e T_2 e pelos transdutores F_1 e F_2 , enquanto os sensores T_9 , T_{10} e F_5 adquiriram os dados da parte composta pelo meio poroso seco (MS), utilizado como referência.

3.4 FATOR ASSOCIADO AO SISTEMA EVAPORATIVO

Para mensurar o desempenho do sistema de resfriamento evaporativo em relação à parte da cobertura utilizada como referência, neste caso a disposição do material poroso seco, foi necessário comparar os valores de fluxo de calor transferido para cada parte da cobertura. Foi definido, dessa forma, o conceito de fator associado aos testes evaporativos (γ_{evap}):

$$\gamma_{evap} = \frac{q''_{MS}}{q''_{ME}} = \frac{q''_{F_5}}{q''_{F_2}}, \quad (3.4)$$

onde q''_{MS} é o fluxo de calor transferido para o interior da seção de testes

através da parte composta pelo material seco, e q''_{ME} é fluxo de calor transferido para o interior da seção de testes através da parte coberta pelo material evaporativo.

Os dados adquiridos através dos sensores F_2 e F_5 serão utilizados no cálculo dos fatores associados ao sistema evaporativo, pois esses fluxímetros apresentam simetria, ou seja estão equidistantes do centro. Dessa forma, para o cálculo de γ_{evap} , o valor de q''_{ME} será dado pelo fluxímetro F_2 e o q''_{MS} pelo F_5 .

Quando os valores de γ_{evap} estiverem entre zero e um, significa que a disposição do material poroso seco, utilizado como referência, apresenta melhor desempenho no que se refere à redução da carga térmica transferida para o interior da cobertura. Quando γ_{evap} for igual a um, os dois sistemas possuem a mesma capacidade de redução dos fluxos térmicos. Já para valores de γ_{evap} maiores que um, o sistema evaporativo possui melhor desempenho na diminuição da quantidade de calor transferida para o interior da cobertura.

3.5 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS POROSOS

Para que se conheça algumas propriedades térmicas utilizadas na verificação analítica, foi necessário realizar a caracterização dos materiais porosos aplicados a este estudo. Para isso foram realizados ensaios de condutividade térmica, absorvidade e microscopia eletrônica de varredura dos materiais utilizados.

3.5.1 Condutividade e Resistência Térmica

A condutividade térmica do material poroso de fibra cerâmica foi obtida através de ensaios realizados no Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E) da Universidade Federal de Santa Catarina, baseado na Norma Técnica ASTM C-518 "*Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus*". O procedimento realizado é apresentado no Apêndice A.

Os resultados obtidos no teste podem ser vistos da Tabela 5, e mostraram que o material poroso de fibra cerâmica evaporativo (molhado) possui a condutividade térmica aproximadamente oito vezes maior do que o mesmo material seco. Para o tecido de algodão, devido à sua pequena espessura (0,4 mm), não foi possível realizar os testes de

condutividade térmica, e seu valor para os casos seco e molhado, foram retirados da literatura (BERGMAN et al., 2014).

Tabela 5 – Condutividade e resistência térmica da amostra seca e molhada

Material	Condutividade Térmica [Wm ⁻¹ K ⁻¹]	Resistência Térmica [m ² KW ⁻¹]
Fibra Cerâmica Seca	0,055	0,2380
Fibra Cerâmica Molhada	0,460	0,0290
Tecido de Algodão	0,060	0,0066

A temperatura média do ensaio foi de 25 °C, e as amostras possuíam dimensões de 100 x 100 mm. A incerteza estimada é de 10 %, e o intervalo de confiança 95 %.

Já era esperado que o valor da condutividade térmica do material molhado fosse maior, uma vez que, a 25 °C, a condutividade térmica da água (0,59 Wm⁻¹K⁻¹) é aproximadamente vinte e duas vezes maior que a do ar (0,03 Wm⁻¹K⁻¹) e os poros do material estão preenchidos com água, quando ele está umedecido, e com ar, quando seco.

3.5.2 Refletividade e Absortividade

Para superfícies opacas, a fração da radiação que é absorvida por uma superfície, denominada absortividade (α), e a fração refletida, denominada refletividade (ρ), estão relacionados de acordo com Bergman et al. (2014), através da Equação 3.5:

$$\alpha + \rho = 1 \quad (3.5)$$

Para se conhecer os valores da absortividade dos materiais utilizados nesse estudo, foram realizados ensaios de refletividade no Centro Brasileiro de Eficiência Energética em Edificações (CB3E) da Universidade Federal de Santa Catarina, baseado na Norma Técnica ASTM C-1549 "*Standard Test Method for Determination of Solar Reflectance Near Ambient Temperature Using a Portable Solar Reflectometer*". Os valores de refletividade medidos foram introduzidos na Equação 3.5, e foram obtidos os valores da absortividades dos materiais.

Os materiais submetidos aos ensaios de refletividade foram o polipropileno o material de fibra cerâmica e o tecido de algodão, sendo os dois últimos testados com a superfície seca e molhada. Os dados adquiridos através dos testes da refletividade dos materiais, e suas respectivas

Tabela 6 – Refletividade e absorptividade solar dos materiais utilizados nesse estudo

Material	ρ	α
Polipropileno	0,476	0,524
Fibra Cerâmica Seca	0,792	0,208
Fibra Cerâmica Molhada	0,505	0,495
Tecido Seco + Polipropileno	0,739	0,261
Tecido Molhado + Polipropileno	0,580	0,420

absorptividades, calculadas a partir da Equação 3.5 são apresentados na Tabela 6.

Como o tecido de algodão pode ser considerado um material semitransparente, o seu valor de refletividade foi mensurado já sobre o polipropileno, desse forma foi retirado o valor da refletividade do conjunto tanto para o tecido seco, quanto para o tecido molhado. Os resultados mostraram que o valor das absorptividades aumentam quando o material é umedecido, sendo esse aumento cerca de 2,3 e 1,6 vezes para a fibra cerâmica e o tecido, respectivamente. O maior valor de absorptividade encontrado foi para o polipropileno, e o menor para o material de fibra cerâmica seco.

3.5.3 Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV

Para se observar a superfície dos materiais utilizados e a disposição das fibras e espaços vazios, as amostras dos meios porosos foram submetidas a ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), através do equipamento JEOL JSM-6390LV, no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) da Universidade Federal de Santa Catarina. Por não se tratarem de materiais condutores, as amostras foram previamente preparadas, sendo recobridas com ouro. Isso ocorreu através de um equipamento para recobrimento e deposição metálica sobre amostras não condutoras, denominado *Sputter*, da marca Leica, modelo EM SCD500.

As imagens abaixo foram obtidas através do ensaio de microscopia eletrônica, onde houve uma ampliação de 500 e 50 vezes para o material de fibra cerâmica e o tecido respectivamente. Os espaços vazios preenchidos com água nos testes evaporativos podem ser observadas nas Figuras 19 e 20, assim como as fibras que compõe os materiais.

Esses ensaios foram realizados com o objetivo de observar a dis-

posição das fibras do material poroso, uma vez que no estudo realizado por Crawford e da Silva (2014), a membrana porosa utilizada sofreu desgaste no local onde se localizava a mangueira. Esse desgaste não foi observado no presente trabalho e por esse motivo não foi realizado o MEV do material utilizado após os testes.

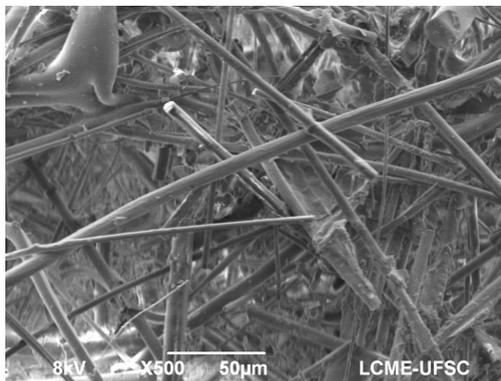


Figura 19 – Imagens obtidas através do MEV, para o material de fibra cerâmica

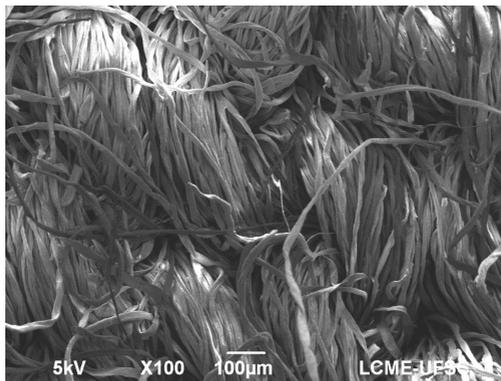


Figura 20 – Imagens obtidas através do MEV, para o tecido de algodão

4 VERIFICAÇÃO ANALÍTICA

Esse capítulo é destinado a apresentar os balanços de energia, para os sistemas nas três situações que serão estudadas nesse trabalho: cobertura exposta ao ambiente, a disposição de um material poroso seco e um material poroso evaporativo (molhado) sobre a cobertura.

As equações obtidas através do balanço de energia serão inseridas no software EES (*Engineering Equation Solver*) com o objetivo de resolver o sistema de equações e dessa forma encontrar o fluxo de calor direcionado ao interior da cobertura, sem o sistema de resfriamento passivo (q''_{SN}), com o meio poroso seco (q''_{MS}) e com o meio poroso evaporativo (q''_{ME}).

Uma representação esquemática da transferência de calor para os sistemas descritos acima pode ser vista na Figura 21, onde a Figura 21(a) representa o polipropileno que simula a cobertura, a Figura 21(b) o conjunto polipropileno e material poroso seco e a Figura 21(c) o conjunto polipropileno e meio poroso evaporativo.

O calor recebido por radiação no volume de controle e que é absorvido pela superfície da seção de testes é mostrado na Equação 4.1

$$q_{abs} = \alpha GA, \quad (4.1)$$

onde α é a absorvidade do material, G a irradiação solar global e A é área da seção transversal à transferência de calor. Os subscritos SN, MS e ME referem-se à parte da cobertura sem a disposição do material poroso, a parte da cobertura composta pelo material poroso seco e a parte da cobertura composta pelo material poroso evaporativo, respectivamente.

O calor transferido por condução é igual à diferença de temperatura entre a superfície (T_S) e a parte interna (T_{int}) sobre a resistência térmica de condução,

$$q_{cond} = \frac{T_S - T_{int}}{R_{cond,tot}}. \quad (4.2)$$

As resistências térmicas por condução do material de polipropileno utilizado para simular a cobertura ($R_{cond,poli}$), do material poroso ($R_{cond,MS}$) seco e do material poroso evaporativo ($R_{cond,ME}$) podem ser calculadas da seguinte forma,

$$R_{cond,poli} = \frac{\delta_{poli}}{k_{poli}A}, \quad (4.3)$$

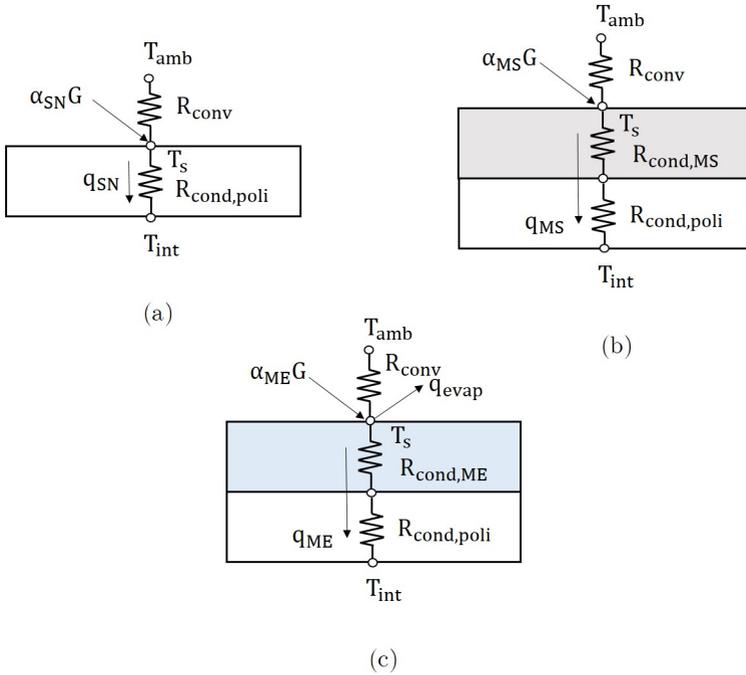


Figura 21 – Modelo Térmico (a) Cobertura exposta ao ambiente, (b) Material poroso seco disposto sobre a cobertura (c) Material poroso evaporativo disposto sobre a cobertura

$$R_{cond,MS} = \frac{\delta_{MS}}{k_{MS}A} \quad (4.4)$$

e

$$R_{cond,ME} = \frac{\delta_{ME}}{k_{ME}A}, \quad (4.5)$$

onde δ_{poli} , δ_{MS} e δ_{ME} são, nessa ordem, as espessuras do polipropileno, do material poroso seco e do material evaporativo, e k_{poli} , k_{MS} e k_{ME} são as condutividades térmicas do polipropileno, do material poroso seco, e do material evaporativo, respectivamente.

Para o caso (a) a resistência total é igual à resistência do polipropileno ($R_{cond,poli}$), porém nos casos (b) e (c) há uma composição de duas resistências em série, devido à existência de duas camadas de diferentes materiais. Então, a resistência total equivalente de condução, para os três casos fica,

$$R_{cond,tot,a} = R_{cond,poli}, \quad (4.6)$$

$$R_{cond,tot,b} = R_{cond,poli} + R_{cond,MS} \quad (4.7)$$

e

$$R_{cond,tot,c} = R_{cond,poli} + R_{cond,ME}. \quad (4.8)$$

Dessa forma, o calor total transferido por condução para os três casos fica:

$$q_{cond,a} = \frac{T_S - T_{int}}{R_{cond,tot,a}}, \quad (4.9)$$

$$q_{cond,b} = \frac{T_S - T_{int}}{R_{cond,tot,b}} \quad (4.10)$$

e

$$q_{cond,c} = \frac{T_S - T_{int}}{R_{cond,tot,c}}. \quad (4.11)$$

O calor retirado do sistema por convecção é apresentado na Equação 4.12,

$$q_{conv} = \frac{T_S - T_{amb}}{R_{conv}}, \quad (4.12)$$

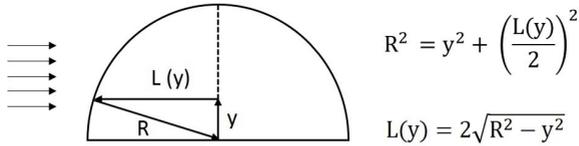


Figura 22 – Representação esquemática da hipótese de o semidisco ser um conjunto de infinitas placas planas

onde a resistência térmica por convecção (R_{conv}), pode ser calculada por

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv}A}, \quad (4.13)$$

onde h_{conv} é o coeficiente de troca de calor por convecção, o qual pode ser encontrado através do número de Nusselt, definido de acordo com a Equação 4.14

$$\overline{Nu}_L = \frac{\overline{h}_{conv}L}{k}. \quad (4.14)$$

O número de Nusselt para um semidisco, não foi encontrado na literatura. Uma alternativa foi considerar o semidisco como um conjunto de infinitas placas planas, uma vez que o Nu para a placa plana é conhecido. Cada placa plana considerada, tem seu comprimento L , como uma função da distância (y) até a placa plana central, como mostra a Figura 22. Sabe-se que para a placa plana, em regime de escoamento turbulento,

$$\overline{Nu}_{L,turbulento} = 0,037Re_L^{\frac{4}{5}}Pr^{\frac{1}{3}}, \quad (4.15)$$

para $0,6 \leq Pr \leq 60$ e $Re_{x,c} \leq Re_L \leq 10^8$.

Igualando as Equações 4.14 e 4.15 temos,

$$\overline{h}_{conv,p} = \frac{0,037\left(\frac{\rho v}{\mu}\right)^{\frac{4}{5}}Pr^{\frac{1}{3}}k}{L^{\frac{1}{5}}}. \quad (4.16)$$

Substituindo na Equação 4.16 o valor de L em função de y , encontra-se a expressão para $\overline{h}_{conv,p}$ em função de y ,

$$\bar{h}_{conv,p} = \frac{0,037\left(\frac{\rho v}{\mu}\right)^{\frac{4}{5}} Pr^{\frac{1}{3}} k}{(2\sqrt{R^2 - y^2})^{\frac{1}{5}}}. \quad (4.17)$$

Integrando o coeficiente de convecção de 0 a R, e dividindo pela área total do semidisco, obtêm-se o coeficiente de convecção médio ($\bar{h}_{conv,s}$) na área do semidisco, dado pela Equação 4.18,

$$\bar{h}_{conv,s} = \frac{2}{\pi R^2} \int_0^R \bar{h}_{conv,p} L(y) dy. \quad (4.18)$$

Substituindo a expressão do coeficiente de convecção na Equação 4.18 e resolvendo a integral, encontra-se o coeficiente de convecção médio $\bar{h}_{conv,s}$ para o semidisco,

$$\bar{h}_{conv,s} = \frac{0,0442432 Re_R^{\frac{4}{5}} Pr^{\frac{1}{3}} k}{R}, \quad (4.19)$$

dessa forma, o número de Nusselt para um semidisco de raio R é,

$$\overline{Nu}_R = 0,0442432 Re_R^{\frac{4}{5}} Pr^{\frac{1}{3}}. \quad (4.20)$$

O mesmo procedimento foi realizado para regime de escoamento laminar, em que a correlação utilizada foi:

$$\overline{Nu}_{L,laminar} = 0,664 Re_L^{\frac{1}{2}} Pr^{\frac{1}{3}}, \quad (4.21)$$

e para regime de transição, onde tem-se uma camada limite mista:

$$\overline{Nu}_{L,misto} = (0,037 Re_L^{\frac{4}{5}} - 871) Pr^{\frac{1}{3}}, \quad (4.22)$$

porém percebeu-se, através dos resultados simulados, que ao utilizar-se a correlação para regime laminar, quando $Re \leq 5 \times 10^5$ e a correlação para camada limite mista quando $Re > 5 \times 10^5$, o resultado não difere-se significativamente do valor obtido ao utilizar-se a correlação para regime completamente turbulento, apresentada na Equação 4.15. Os valores de erro percentual médio calculados quando utilizou-se somente o regime turbulento ficou em 7 % para a cobertura exposta, e 15 % para a parte composta pelo meio seco. Por esse motivo decidiu-se utilizar a correlação para regime de escoamento turbulento nas simulações.

Para os testes evaporativos, foi necessário adicionar às equações, a parcela do calor retirado do sistema por evaporação, que pode ser expressa por,

$$q_{evap} = \dot{m}h_{LV}, \quad (4.23)$$

onde \dot{m} é a vazão mássica da água e h_{LV} é o calor latente de vaporização.

A partir das definições acima, pode-se realizar o balanço de energia para os três casos apresentados,

caso (a),

$$q_{SN} = q_{cond,tot,a} = q_{abs} - q_{conv}, \quad (4.24)$$

caso (b),

$$q_{MS} = q_{cond,tot,b} = q_{abs} - q_{conv} \quad (4.25)$$

e caso (c),

$$q_{ME} = q_{cond,tot,c} = q_{abs} - (q_{conv} + q_{evap}). \quad (4.26)$$

Para encontrar os fluxos de calor q''_{SN} , q''_{MS} e q''_{ME} , basta dividir os valores encontrados para q_{SN} , q_{MS} e q_{ME} pela área da seção transversal à troca térmica, que para o semidisco é dado por,

$$A_{semi} = \frac{\pi R^2}{2}. \quad (4.27)$$

5 RESULTADOS

Esse capítulo destina-se a apresentar os resultados e a discussão dos testes realizados.

5.1 TESTE PRELIMINAR - MS/MS

O teste preliminar ocorreu com os dois semicírculos do material poroso seco sobre a cobertura (MS/MS), como mostra o esquema apresentado na Figura 23.

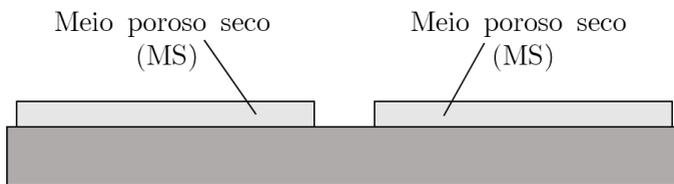


Figura 23 – Representação esquemática do teste MS/MS

A data e o período em que ocorreu o teste, o valor médio da temperatura (\bar{T}_{amb}), da velocidade horizontal do vento (\bar{v}) e da umidade relativa (\bar{UR}), são apresentados na Tabela 7. Os resultados dos experimentos podem ser vistos nas Figuras 24 e 25, as quais mostram respectivamente a temperatura e os fluxos de calor obtidos ao longo do dia.

Tabela 7 – Data, período e média das condições climáticas obtidas durante o experimento MS/MS

Data	Hora Inicial	Hora Final	\bar{T}_{amb} [°C]	\bar{v} [m/s]	\bar{UR} [%]
22/nov/2016	9:00	16:07	22,3	6,7	64,7

Pode ser observada uma boa homogeneidade nas leituras dos sensores, porém uma tendência foi observada nos dados adquiridos em alguns sensores, nesse e nos experimentos subsequentes. Como mostra a Figura 24, os valores apresentados pelos termorresistores T_7 e T_{10} ficaram abaixo dos valores adquiridos pelos demais. Para os transdutores de fluxo de calor, como visto na Figura 25, pode-se observar que os

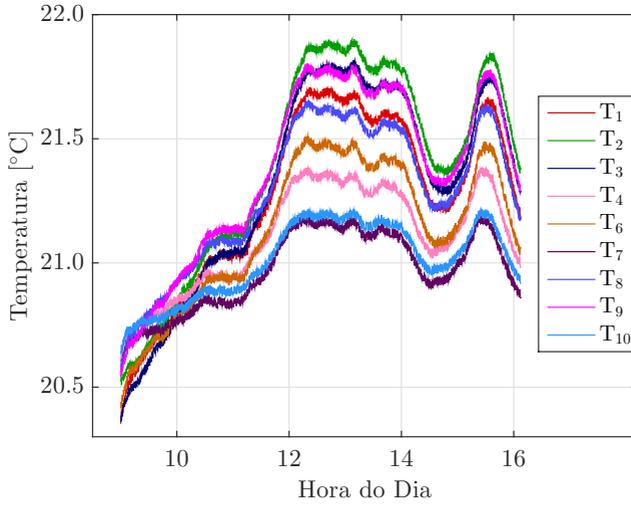


Figura 24 – Temperaturas obtidas no teste MS/MS

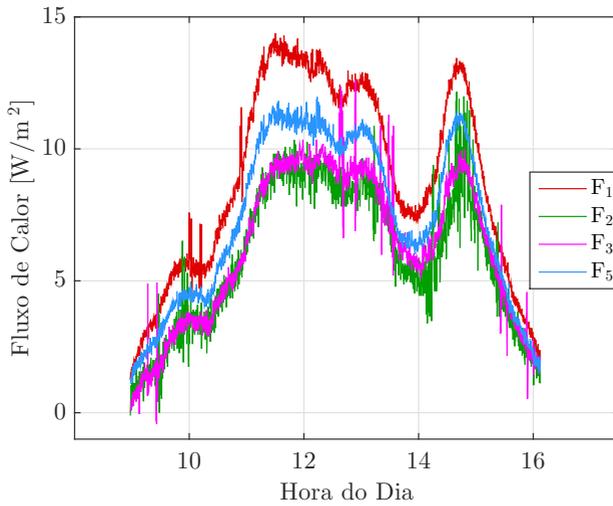


Figura 25 – Fluxos de calor obtidos no teste MS/MS

resultados do sensor F_1 ficou um pouco acima dos valores adquiridos pelos outros transdutores.

Para poder entender esse comportamento, foi necessário realizar uma análise da localização dos sensores em relação aos canais de água presentes no trocador de calor espiral. Para isso, os desenhos dos projetos do trocador e da cobertura com o posicionamento dos sensores, foram sobrepostos, como mostra a Figura 26.

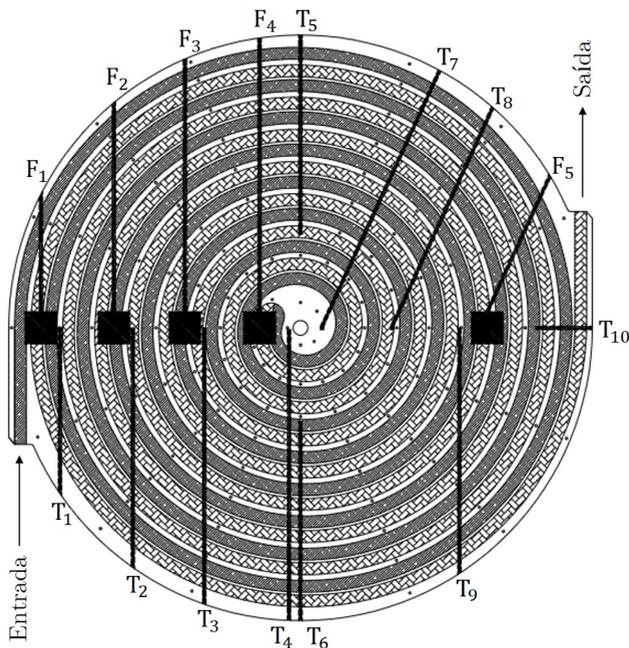


Figura 26 – Análise de sobreposição dos sensores sobre o trocador de calor

Pode-se perceber que o sensor T_{10} está possivelmente sobre um canal de água fria, logo na segunda volta do trocador de calor e devido a influência desse canal a leitura da temperatura nesse sensor fica abaixo das demais. O fluxímetro F_1 , apresenta um problema semelhante, estando localizado logo na entrada de água, onde ela se encontra com uma menor temperatura. Isso faz com que mais calor seja transferido através do fluxímetro, fazendo com que sua leitura também fique acima das demais.

O sensor T_7 encontra-se sobre a parte central do trocador, com-

posta pelo polipropileno, que funciona como um isolante térmico, e por esse motivo as leituras desse sensor também ficam um pouco abaixo da média.

Essas variações mostram que o trocador de calor não consegue manter a temperatura homogênea, na parte interna da seção de testes, como esperado. Isso poderia ser melhorado utilizando um disco de alumínio de maior espessura na parte superior do trocador, uma vez que o utilizado nesse trabalho apresenta 6,3 mm de espessura.

5.2 TESTES NÃO EVAPORATIVOS - MS/SN

Os experimentos MS/SN foram realizados com parte da cobertura coberta pelo material poroso (MS), e parte da cobertura exposta ao ambiente (SN). Uma representação esquemática dos testes MS/SN pode ser vista na Figura 27.

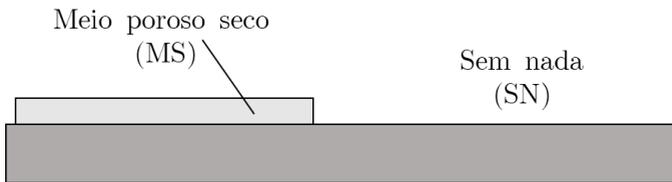


Figura 27 – Representação esquemática do teste MS/SN

A Tabela 8 apresenta a data e o período da realização dos testes, assim como o valor médio da temperatura ambiente, velocidade horizontal do vento e umidade relativa.

Tabela 8 – Data, período e média das condições climáticas obtidas durante os experimentos MS/SN

Material	Data	Hora Inicial	Hora Final	\bar{T}_{amb} [°C]	\bar{v} [m/s]	\overline{UR} [%]
13 mm	21/nov/16	8:56	17:03	28,9	6,0	51,1
6 mm	10/jan/17	10:10	17:24	33,8	7,3	56,9
Tecido	18/jan/17	8:56	17:39	30,1	8,1	64,0

As Figuras 28 e 29 apresentam, nessa ordem, os dados de temperatura e fluxo de calor adquiridos durante o experimento realizado com o material poroso seco de 13 mm de espessura.

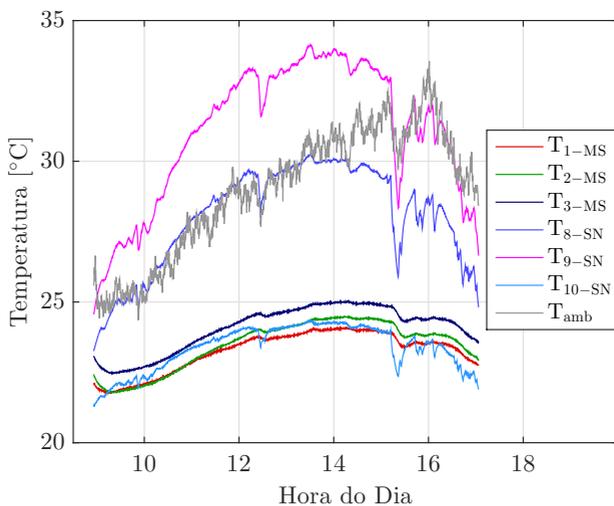


Figura 28 – Temperatura obtidas no teste MS/SN com o material poroso de 13 mm de espessura

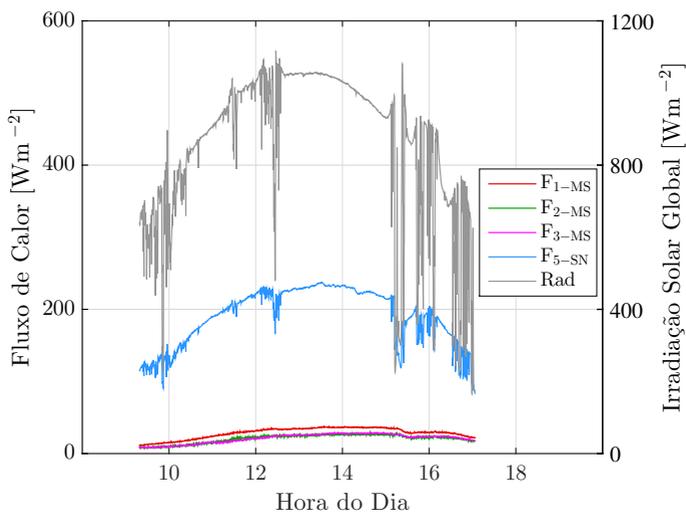


Figura 29 – Fluxos de calor e irradiação solar global obtidos no teste MS/SN com o material poroso de 13 mm de espessura

Por se tratar de um material com um baixo valor de condutividade térmica, como mostrado na Tabela 5, a disposição do meio poroso seco sobre a cobertura funciona como um isolante, aumentando a resistência térmica do sistema, tornando-se uma barreira para o transporte de calor direcionado ao interior da seção de testes, fazendo com que os valores de temperaturas e fluxos de calor obtidos na parte da cobertura composta pelo material poroso (MS), sejam menores que as obtidas na parte exposta ao ambiente (SN).

Esse comportamento é observado nas Figuras 28 e 29, onde os termorresistores T_1 , T_2 e T_3 e o transdutores F_1 , F_2 e F_3 , que se localizam na parte da cobertura composta pelo material poroso, apresentam valores muito abaixo dos demais sensores, T_8 , T_9 e F_5 localizados na parte exposta ao ambiente. A exceção é o sensor T_{10} que também se localiza na parte exposta, porém sofre uma maior influência do canal de água refrigerado do trocador de calor, como comentado na seção acima.

Foram calculadas as diferenças de temperatura, entre o lado exposto ao ambiente, e o lado composto pelo material poroso seco, representados, nessa ordem, pelos sensores T_9 e T_2 ,

$$\Delta T = T_{T_9} - T_{T_2} \quad (5.1)$$

que estão localizados simetricamente em relação ao centro da cobertura, como foi apresentado na Figura 26.

O valor máximo entre as diferenças de temperatura atingido nesse teste (ΔT_{\max}) foi de 9,8 °C, em torno das 13 horas, enquanto a diferença média de temperatura (ΔT_{med}), ao longo do experimento, foi de 7,6 °C.

As diferenças entre o fluxo de calor transferido pela parte exposta ao ambiente, representada pelo transdutor F_5 , e a parte composta pelo material poroso, representado pelo transdutor F_2 , foram calculadas através da diferença dos valores obtidos entre esses dois sensores, também simétricos,

$$\Delta q'' = q''_{F_5} - q''_{F_2}. \quad (5.2)$$

O máximo valor encontrado para as diferenças entre os fluxos ($\Delta q''_{\max}$) foi de 211,8 Wm^{-2} , também em torno das 13 horas. Já a média das diferenças entre o fluxo de calor transferido pela parte exposta ao ambiente e a parte que está sob o material poroso foi de 165,4 Wm^{-2} .

Através da análise dos resultados pode-se concluir que a dispo-

sição do material poroso de 13 mm de espessura sobre a cobertura, ocasionou uma redução média, no período de realização do teste, de 89 % no fluxo de calor transferido para o interior da seção de testes.

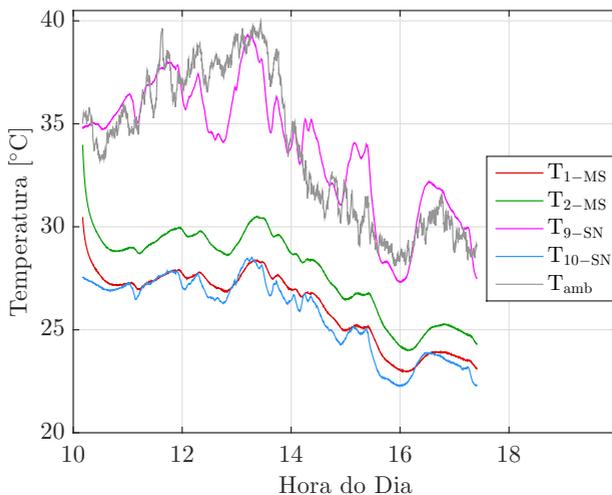


Figura 30 – Temperaturas obtidas no teste MS/SN com o material poroso de 6 mm de espessura

Os resultados para os testes MS/SN com o material de 6 mm de espessura são apresentados nas Figuras 30 e 31. As Figuras 30 e 31 mostram que os sensores T₁, T₂, F₁ e F₂, localizados na parte da cobertura onde se encontra o material poroso, apresentam valores muito abaixo dos encontrados pelos sensores T₉ e F₅, localizados na cobertura exposta. Uma exceção é o termorresistor T₁₀, que sofre influência do canal de água fria do trocador de calor, como já explicado na subseção anterior.

Para esse tipo de experimento, ainda pode-se observar o efeito de isolamento térmico, como no teste apresentado anteriormente. Porém como o valor da resistência térmica é diretamente proporcional à espessura do material, a capacidade de bloquear cargas térmicas direcionadas ao interior da seção de testes, para essa sequência de testes, torna-se mais reduzida em comparação a disposição do material que possui 13 mm de espessura.

As diferenças de temperatura para esse experimento também fo-

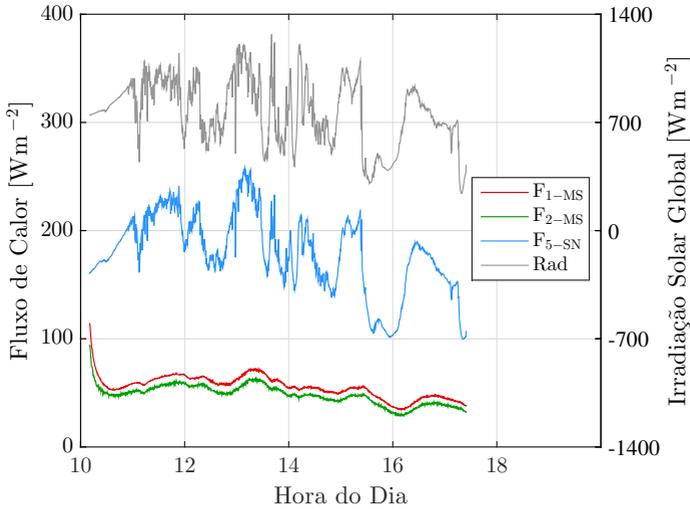


Figura 31 – Fluxos de calor e irradiação solar global obtidos no teste MS/SN com o material poroso de 6 mm de espessura

ram calculadas a partir da Equação 5.1, e o valor máximo encontrado foi de 9,3 °C, próximo as 13 horas, enquanto o valor médio das diferenças ao longo do teste foi de 6,0 °C. As diferenças entre os fluxos de calor transferidos para o interior da cobertura também foram calculado a partir da Equação 5.2. O valor máximo dessa diferença, obtido neste teste, foi de 198,7 Wm^{-2} , também próximo das 13 horas, enquanto o valor médio obtido ao longo do teste foi de 131,3 Wm^{-2} .

A partir dos resultados obtidos durante o teste MS/SN com o material poroso de 6 mm de espessura, pode-se concluir que sua disposição sobre uma cobertura pode reduzir em média 73 % o fluxo térmico transferido para o interior, 16 % a menos do que se utilizamos o mesmo material com 13 mm de espessura.

Pode-se observar também que a adição do material de fibra cerâmica sobre a cobertura, de ambas espessuras, faz com que as temperaturas internas, obtidas através dos termorresistores T_1 e T_2 , fiquem abaixo da temperatura ambiente, enquanto para a cobertura exposta, as temperaturas internas, com exceção das obtidas pelo sensor T_{10} , ficam próximas ou até mesmo maiores que a ambiente, como mostram as Figuras 28 e 30.

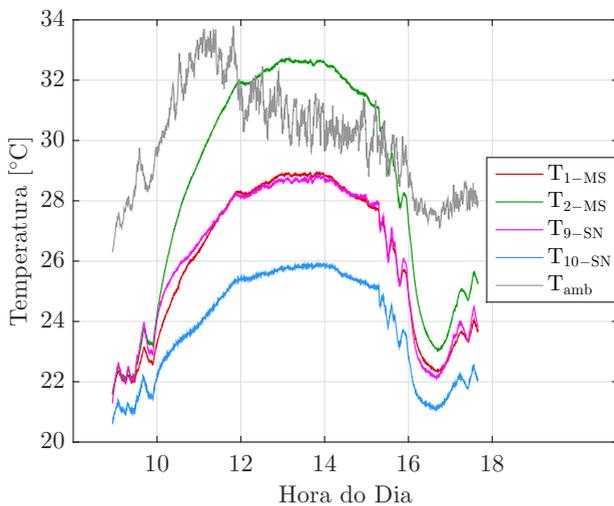


Figura 32 – Temperaturas obtidas no teste MS/SN para o tecido de algodão

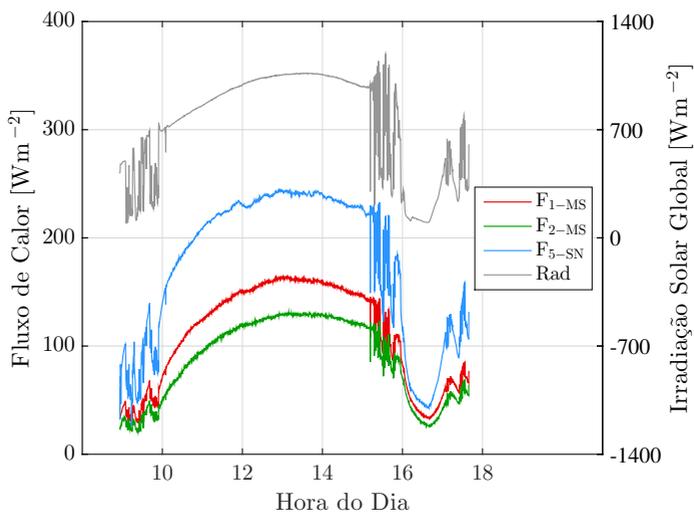


Figura 33 – Fluxos de calor e irradiação solar global obtidos no teste MS/SN para o tecido de algodão

As Figuras 32 e 33 mostram, respectivamente, os valores de temperatura e fluxo de calor obtidos para o teste MS/SN, realizado com o tecido de algodão.

Como a espessura desse material é muito pequena, se comparadas aos demais utilizados nesse estudo, sua disposição sobre a cobertura representa uma resistência térmica adicionada ao sistema muito pequena. Porém apesar disso, os dados de fluxos de calor adquiridos através dos sensores F_1 e F_2 , que se localizam na parte da cobertura composta pelo tecido seco, apresentam valores menores que os obtidos através do sensor F_5 , localizado na parte exposta ao ambiente, como mostra a Figura 33. Isso pode ser explicado devido a diferença entre as absorvidades do tecido seco e do polipropileno utilizado como cobertura, que, como mostrado na Tabela 6, é duas vezes maior para o polipropileno, fazendo com que esse material absorva uma maior parcela do calor proveniente do sol, e conseqüentemente aumentando a transferência de calor para o interior da cobertura, fazendo com que os valores obtidos no sensor que se encontra nessa parte, F_5 , sejam maiores.

Para os dados de temperaturas esse comportamento não é observado, uma vez que os valores obtidos pelos sensores T_1 e T_9 , localizados em lados opostos da cobertura, apresentam, durante todo o experimento, valores muito próximos. Porém os valores do sensor T_2 , localizado sob a parte composta pelo tecido de algodão, que absorve uma menor parcela do calor devido à sua menor absorvidade, apresenta os maiores valores de temperatura do teste, não sendo condizente com o que foi apresentado acima. O sensor T_{10} , como comentado na seção acima, sofre uma maior influência do canal de água refrigerado do trocador de calor, e por isso possui valores sempre abaixo dos demais sensores.

5.3 TESTES EVAPORATIVOS - ME/MS

Os experimentos ME/MS foram realizados com parte da cobertura composta pelo material poroso evaporativo (ME), e parte composta pelo material seco (MS), como pode ser visto na Figura 34.

A data e o período da realização dos testes, assim como o valor médio da temperatura ambiente, velocidade horizontal do vento e umidade relativa são apresentados na Tabela 9.

Para os testes ME/MS realizados com os materiais de fibra cerâmica, nas duas espessuras disponíveis, os dois lados da cobertura estão

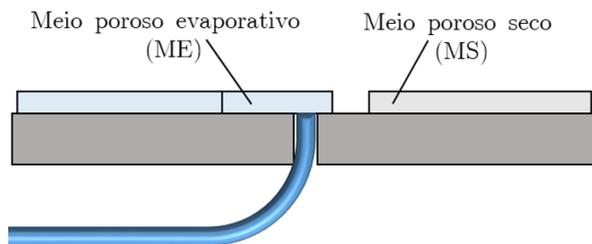


Figura 34 – Representação esquemática do teste ME/MS

Tabela 9 – Data, período e média das condições climáticas obtidas durante os experimentos ME/MS

Material	Data	Hora Inicial	Hora Final	\bar{T}_{amb} [°C]	\bar{v} [ms ⁻¹]	\bar{UR} [%]
13 mm	19/jan/17	9:32	17:58	24,3	12,5	63,1
6 mm	20/jan/17	9:10	15:20	27,9	10,3	56,9
Tecido	13/jan/17	9:48	17:29	32,2	6,6	42,1

compostos por sistemas de resfriamento passivo, um deles o sistema de resfriamento evaporativo, onde o meio poroso encontra-se umedecido, e o outro o sistema de isolamento térmico, onde o meio poroso encontra-se seco. Os resultados do experimento realizado com o material poroso de 13 mm de espessura podem ser vistos nas Figuras 35 e 36.

Os maiores valores de temperatura e fluxo de calor foram observados nos sensores T_1 , T_2 , F_1 e F_2 , que se encontram sob a parte da cobertura composta pelo sistema evaporativo. Esse comportamento pode ser explicado através da análise da condutividade térmica do material poroso de fibra cerâmica, a qual foi maior quando o material estava umedecido. Os valores mostrados na Tabela 5 mostraram que a resistência térmica desse material seco, é cerca de oito vezes maior que a do material molhado, sendo dessa forma uma barreira eficiente para a transferência de calor para o interior da seção de testes, não sendo compensada pelo calor retirado do sistema através da evaporação da água. Outro ponto a ser observado é que a absorvidade do material de fibra cerâmica aumenta mais de duas vezes quando ele é umedecido, como mostrou a Tabela 6. Isso faz com que uma maior parcela da radiação solar seja absorvida pelo material quando utiliza-se o sistema

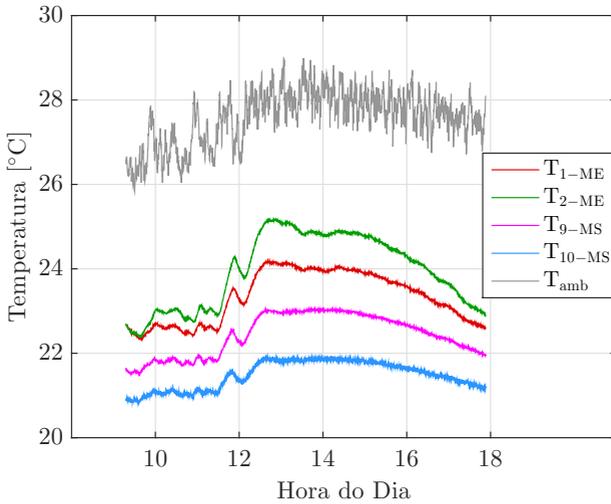


Figura 35 – Temperaturas obtidas no teste ME/MS para o material poroso de 13 mm de espessura

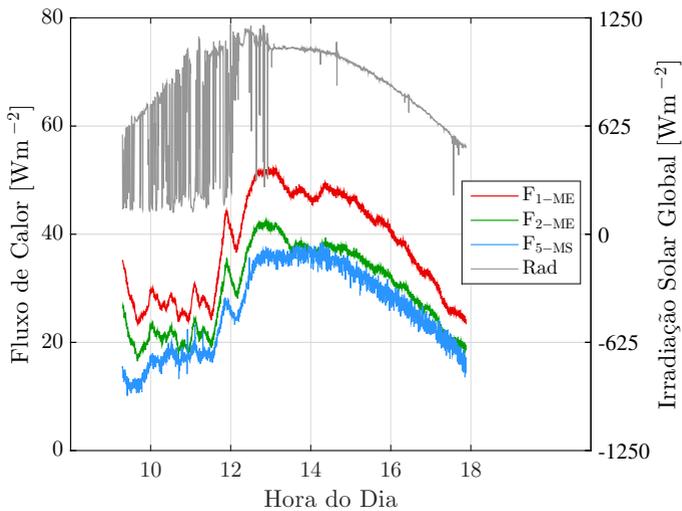


Figura 36 – Fluxos de calor e irradiação solar global obtidos no teste ME/MS para o material poroso de 13 mm de espessura

evaporativo, se comparado à utilização do material seco.

Através desses resultados pode-se perceber que o material poroso seco é mais eficiente, no que se refere à diminuição da carga térmica, do que o sistema evaporativo. Para entender o comportamento do sistema evaporativo composto pelo material de fibra cerâmica, em relação à uma cobertura exposta, foi realizada uma análise do fator dos sistema evaporativo (ME) e seco (MS) em relação à cobertura sem nada (SN), utilizando os dados adquiridos do teste MS/SN para o material de 13 mm de espessura, mostrados na Figura 29.

Para isso, foram utilizados dados de fluxo de calor que atravessam a cobertura através da parte composta pelo material poroso evaporativo (ME) e pelo material seco (MS), no teste ME/MS, no instante em que a irradiação solar global atingiu 1000 Wm^{-2} , adquiridos nessa ordem pelos transdutores F_5 e F_2 . Já o valor do fluxo de calor que atravessa a cobertura exposta, ou seja, sem o sistema de resfriamento passivo, foi retirado do teste MS/SN, também quando a irradiação global horizontal atingiu 1000 Wm^{-2} , adquirido neste teste através do transdutor F_5 . Todos os valores, foram referentes ao teste com o material poroso de 13 mm de espessura. Em alusão à Equação 3.4, calculou-se os fatores MS/SN (meio seco/sem nada), ME/MS (meio evaporativo/meio seco) e ME/SN (meio evaporativo/sem nada), onde,

$$\gamma_{MS/SN} = \frac{q''_{SN}}{q''_{MS}}, \quad (5.3)$$

$$\gamma_{ME/MS} = \gamma_{evap} = \frac{q''_{MS}}{q''_{ME}} \quad (5.4)$$

e

$$\gamma_{ME/SN} = \frac{q''_{SN}}{q''_{ME}}. \quad (5.5)$$

Os resultados dos fatores calculados podem ser vistos na Tabela 10.

Conforme previsto o meio seco promove uma grande redução do fluxo de calor (razão 12,6) quando aplicado sobre uma superfície. Entretanto o fato do meio evaporativo mostrar-se menos eficiente que o meio seco (razão 0,8), não era esperado. Dois fatores foram determinantes: o fato da absorvidade solar aumentar quando o meio é umedecido (passando de 0,21 para 0,49) e o fato do meio umedecido ser muito mais condutor que o meio seco ($0,46$ contra $0,05 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$). Apesar do baixo fator encontrado, com relação ao meio poroso seco, o meio eva-

Tabela 10 – Fatores dos sistemas de resfriamento passivo, utilizando-se o material poroso de 13 mm de espessura, para valores de irradiação solar global de 1000 Wm^{-2}

	Fatores (γ)
MS/SN	12,6
ME/SN	10,1
ME/MS	0,8

porativo pode mostrar-se mais competitivo em climas mais secos (ainda será discutido na Seção 5.4) e ainda em situações onde o resfriamento noturno é favorável. Nessa situação um meio poroso seco isola a cobertura, dificultando a perda de calor durante a noite. Já o umedecido, por ser mais condutor, permite uma troca de calor entre o ambiente interno e externo. Além disso pode continuar a ocorrer uma pequena parcela de evaporação, resfriando ainda mais a edificação. Uma possível estratégia seria manter o meio umedecido durante a noite e permitir a secagem durante o dia (cortando o suprimento de água). Em certos climas temperados pode-se ter períodos quentes (onde perdas noturnas são bem vindas) e períodos frios onde a perda noturna não é benéfica. Uma possível estratégia seria usar o meio poroso umedecido durante os períodos quentes conforme descrito anteriormente, mas durante os períodos frios mantê-lo seco. Evidentemente tem-se perda da função em períodos de chuva.

A segunda linha da Tabela 10 mostra o desempenho do meio poroso umedecido comparado com uma cobertura sem nada. Nessa situação, enfim conforme esperado, o meio poroso mostrou-se eficiente (razão 10) em função do calor de evaporação. Como a evaporação é um fenômeno superficial e a espessura do meio poroso é apenas necessária para haver um potencial de sucção do líquido, partiu-se para o ensaio de meio porosos mais finos. As Figuras 37 e 38 mostram resultados do mesmo meio poroso mas com espessura igual a 6 mm.

Um comportamento semelhante ao do teste anterior foi observado no teste ME/MS realizado com o material poroso de 6 mm de espessura. Os sensores que apresentaram os maiores valores, foram o T_1 , T_2 , F_1 e F_2 , que também estão localizados na parte da cobertura composta pelo sistema evaporativo, como ocorreu no experimento anterior.

Entretanto, para esse teste, pode-se observar, através da Figura 38, que para um determinado intervalo de tempo (entre 10 e 12 horas), a quantidade de calor transferida para o interior da seção de testes, foi

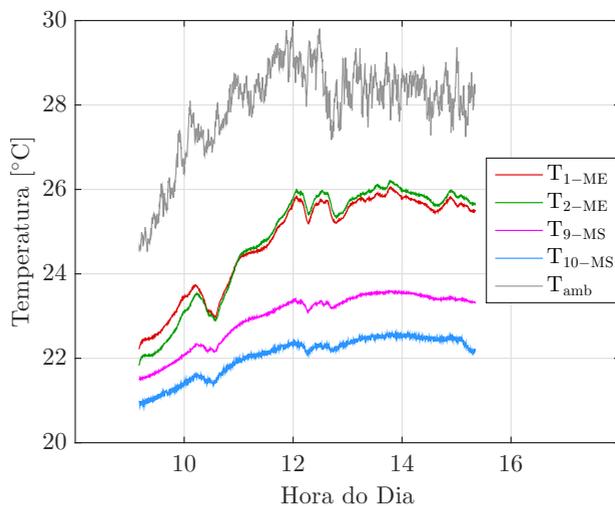


Figura 37 – Temperaturas obtidas no teste ME/MS para o material poroso de 6 mm de espessura

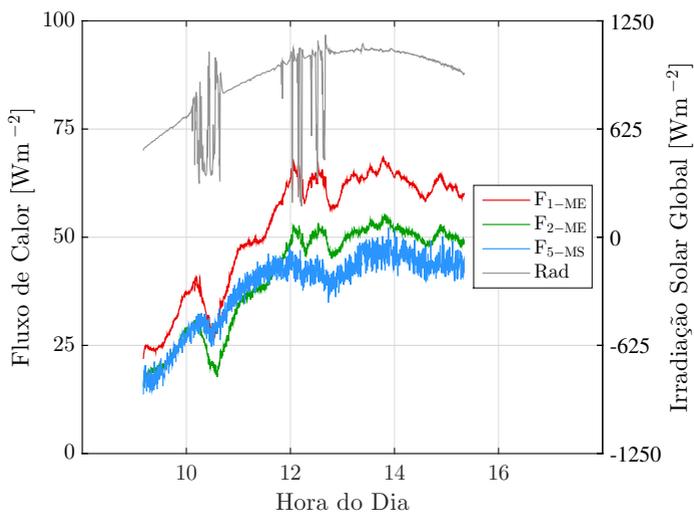


Figura 38 – Fluxos de calor e irradiação solar horizontal obtidos no teste ME/MS para o material poroso de 6 mm de espessura

menor na parte composta pelo sistema evaporativo. Isso pode ser explicado devido a menor espessura do material poroso utilizado nessa etapa do teste, e conseqüentemente uma menor resistência térmica quando seco.

Através dos resultados, pode-se perceber que mesmo reduzindo a espessura do material, o meio poroso seco continua mais eficiente, na maioria do tempo, do que o sistema evaporativo. Para essa sequência de testes, também foi realizada uma análise do fator associado ao sistema evaporativo (ME) em relação à cobertura exposta ao ambiente (SN), onde os valores de fluxo de calor que atravessam a cobertura através do material seco e evaporativo, foram retirados do teste ME/MS, através dos transdutores F_5 e F_2 respectivamente, enquanto os dados do fluxo calor que atravessa a cobertura exposta foram adquiridos do teste MS/SN apresentado na Figura 31, através do transdutor F_5 . Todos os valores foram retirados quando o valor de irradiação solar global atingiu 1000 Wm^{-2} .

Os valores dos fatores MS/SN (meio seco/sem nada), ME/MS (meio evaporativo/meio seco) e ME/SN (meio evaporativo/sem nada), para os testes realizados com o material poroso de 6 mm de espessura são mostrados na Tabela 11.

Tabela 11 – Fatores calculados, utilizando-se o material poroso de 6 mm de espessura, para valores de irradiação solar global de 1000 Wm^{-2}

	Fatores (γ)
MS/SN	5,8
ME/SN	4,8
ME/MS	0,8

Pode-se perceber que para um mesmo valor de irradiação solar global, para diferentes espessuras do material poroso, o valor do fator ME/MS (γ_{evap}) permanece aproximadamente constante, ou seja, a relação entre o material poroso seco e evaporativo em reduzir cargas térmicas não sofreu alterações quando se diminuiu a espessura do material. Já os fatores MS/SN e ME/SN foram reduzidos, pois com um menor valor de espessura, a resistência térmica associada também fica reduzida.

Os resultados da análise dos fatores mostrou que mesmo com uma menor espessura, o material poroso de fibra cerâmica consegue diminuir as cargas térmicas, para esse valor de radiação incidente, em aproximadamente seis vezes quando seco, e cinco vezes quando umedecido.

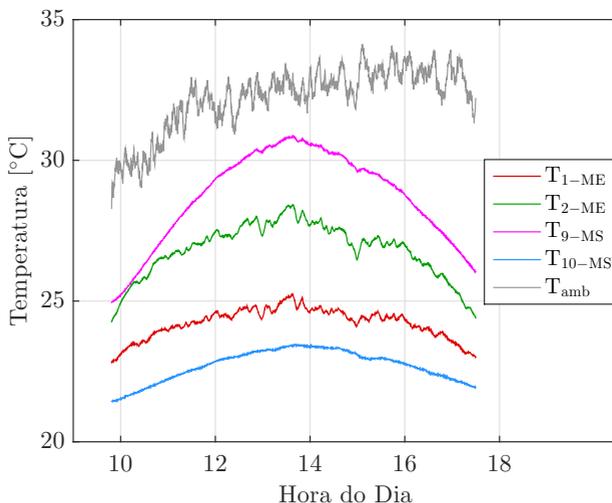


Figura 39 – Temperaturas obtidas no teste ME/MS para o tecido de algodão

Para avaliar os efeitos do resfriamento evaporativo sem as propriedades de isolamento térmico associados ao material, foram realizados testes com o tecido de algodão. Os resultados do experimento ME/MS podem ser vistos nas Figuras 39 e 40.

Como esse material apresenta uma espessura muito pequena (0,4 mm), sua disposição sobre a cobertura representa uma resistência térmica desprezível, não influenciando diretamente na transferência de calor para o interior da seção de testes, além dos efeitos da mudança nos valores de absorvidades.

Por não possuir características de isolamento térmico, esse teste foi considerado o mais adequado para avaliar a performance do sistema evaporativo sobre a cobertura.

Pode-se observar através dos resultados do teste com tecido de algodão, que os sensores localizados na parte da cobertura composta pelo sistema evaporativo, T_1 , T_2 , F_1 e F_2 obtiveram valores de temperaturas e fluxos de calor menores do que os sensores presentes na parte composta pelo tecido de algodão seco, T_9 e F_5 , com exceção do sensor T_{10} que sofre influência do canal de água fria do trocador, como já mencionado acima.

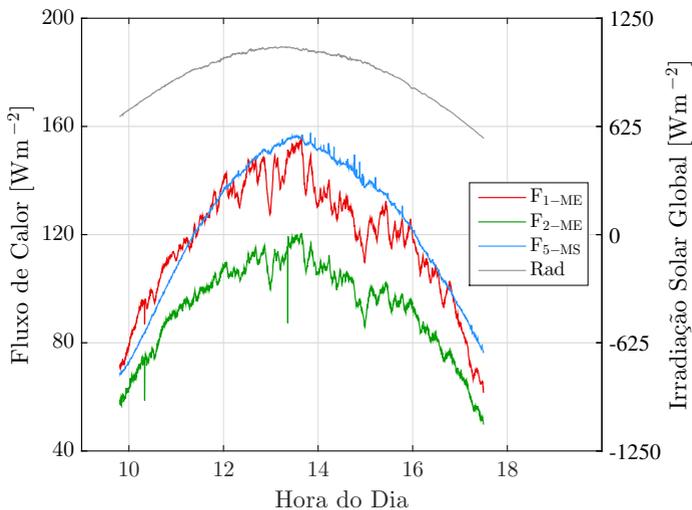


Figura 40 – Fluxos de calor e irradiação solar horizontal obtidos no teste ME/MS para o tecido de algodão

O valor do fator (γ_{evap}), para o teste ME/MS (meio evaporativo/meio seco) com o tecido de algodão, quando a irradiação solar global atingiu 1000 W m^{-2} é apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – Fator calculado, utilizando-se o tecido de algodão, para valores de irradiação solar global de 1000 W m^{-2}

	Fator (γ)
ME/MS	1,3

Para avaliar os efeitos térmicos do resfriamento evaporativo, foram calculadas as diferenças de temperatura e fluxo de calor, para o teste com o tecido de algodão, através das Equações 5.1 e 5.2. O ΔT_{max} encontrado foi de $3,1 \text{ }^\circ\text{C}$, por volta das 15 horas, enquanto o ΔT_{med} , ao longo do experimento, foi de $1,9 \text{ }^\circ\text{C}$. Já $\Delta q''_{max}$ foi de $68,3 \text{ W m}^{-2}$, enquanto $\Delta q''_{med}$ obtido ao longo do teste foi de $30,7 \text{ W m}^{-2}$.

Através da análise de dados, pode-se concluir, que o sistema de resfriamento evaporativo composto pelo tecido de algodão, reduziu em média, 24 % da carga térmica total transferida para o interior da cobertura.

5.3.1 Análise do Fator Associado ao Sistema de Resfriamento Evaporativo

Através da análise do fator associado ao sistema evaporativo (γ_{evap}), calculada a partir da Equação 3.4, pode-se perceber uma forte dependência do seu resultado com a umidade relativa, o que pode ser observado através das Figuras 41, 42 e 43 que apresentam os valores de umidade relativa e fator ao longo do dia, para os testes realizados com o material poroso de 13 mm, 6 mm de espessura e o tecido de algodão, respectivamente.

Através da Figura 41, pode se perceber que próximo as 14 horas, quando a γ_{evap} fica um pouco maior que um, ou seja, quando o fluxo de calor transferido através da parte composta pelo material evaporativo é menor que o da parte composta pelo material seco, coincide com o período que a umidade relativa apresenta os menores valores ao longo do teste.

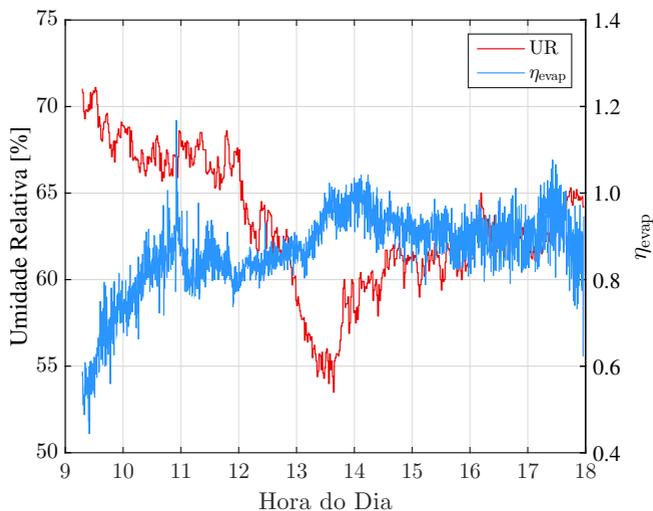


Figura 41 – Fator associado ao sistema evaporativo e umidade relativa do ar, ao longo do dia, para o teste ME/MS com material poroso de 13 mm de espessura

Um comportamento semelhante pode ser visto na Figura 42 onde o intervalo de tempo em que o sistema evaporativo foi mais eficiente do

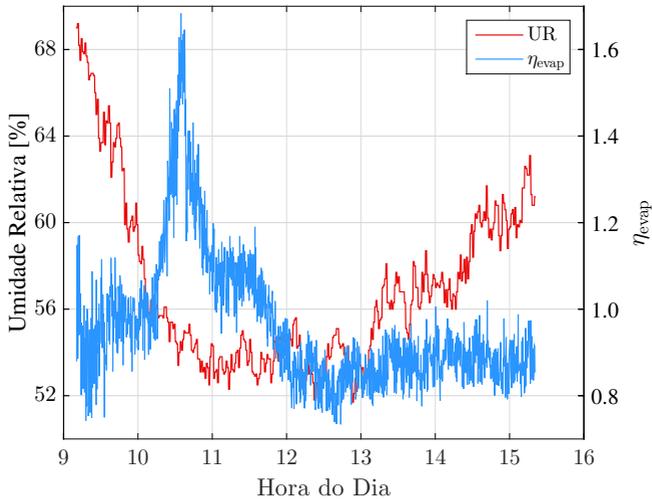


Figura 42 – Fator associado ao sistema evaporativo e umidade relativa do ar, ao longo do dia, para o teste ME/MS com material poroso de 6 mm de espessura

que o não evaporativo, entre 10 e 12 horas, como mostrou a Figura 38, foi o período onde atingiu-se os menores valores de umidade relativa ao longo do teste. Porém, no período entre 12 e 15 horas, quando a umidade relativa aumenta de cerca de 56 para 62 %, o valor de γ_{evap} apresenta valores semelhantes, e fica aproximadamente constante, apesar do aumento da UR.

Já para o teste com o tecido de algodão, durante todo o dia, o sistema evaporativo foi mais eficiente em diminuir as cargas térmicas transferidas para o interior da cobertura, do que a disposição do tecido de algodão seco, utilizado como referência, como mostra a Figura 43. Pode-se observar que no período entre 10 e 13 horas, à medida que a umidade relativa decaí, γ_{evap} aumenta, e próximo às 13 horas, onde o fator alcança seu valor máximo, a umidade relativa é a menor encontrada ao longo do experimento, mostrando a relação entre o desempenho do sistema evaporativo e a umidade relativa.

As Figuras 44, 45 e 46 mostram como a γ_{evap} varia com a umidade relativa, para os experimentos ME/MS realizados com o material poroso de 13 mm, 6 mm de espessura e o tecido de algodão, respectivamente.

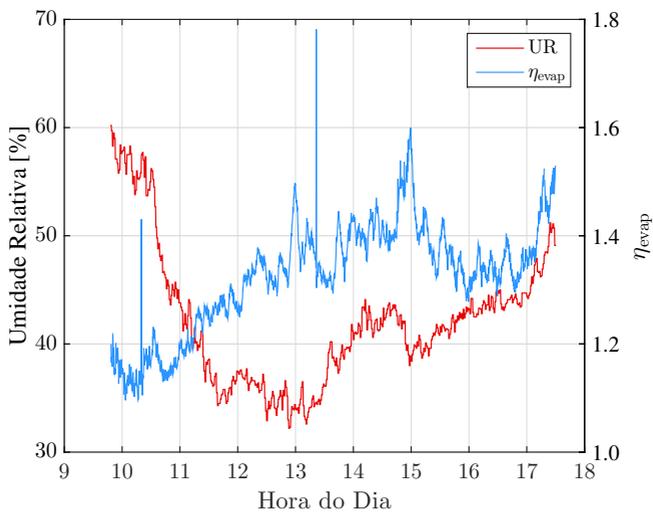


Figura 43 – Fator associado ao sistema evaporativo e umidade relativa do ar, ao longo do dia, para o teste ME/MS com o tecido de algodão

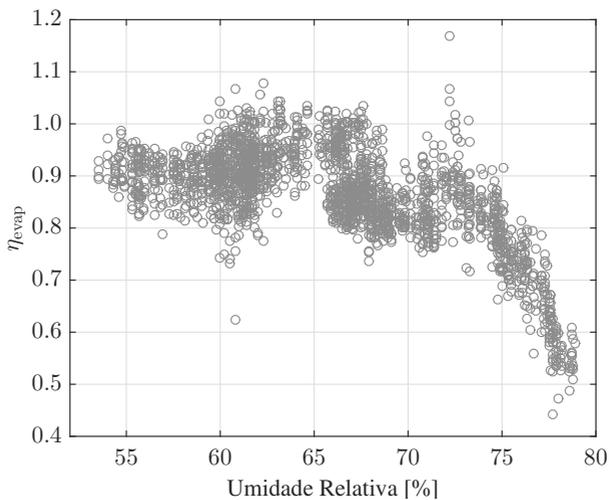


Figura 44 – Fator associado ao sistema evaporativo em função da umidade relativa do ar, para o teste ME/MS com o material poroso de 13 mm de espessura

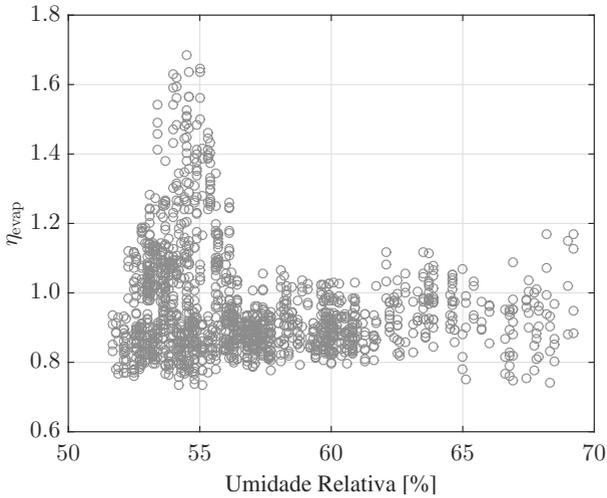


Figura 45 – Fator associado ao sistema evaporativo em função da umidade relativa do ar, para o teste ME/MS com o material poroso de 6 mm de espessura

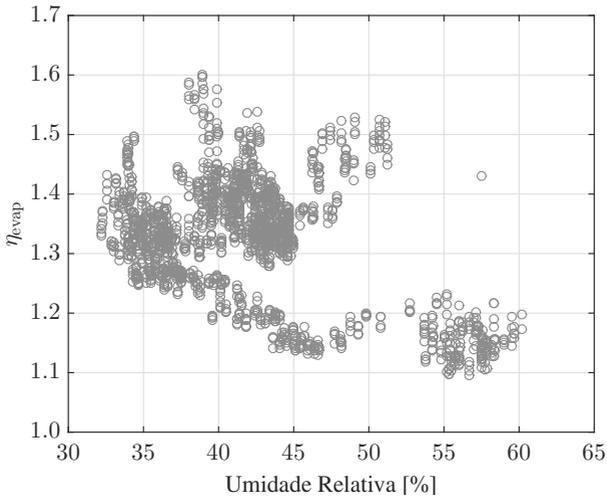


Figura 46 – Fator associado ao sistema evaporativo em função da umidade relativa do ar, para o teste ME/MS com o tecido de algodão

Pode-se observar, que à medida que a umidade relativa aumenta, os fatores associados ao sistema evaporativo tendem a diminuir. Essa dependência é mais fortemente observada no teste realizado com o material de 13 mm de espessura, quando a UR atingiu valores entre 70 e 80 %, como mostrado na Figura 44. Para os demais testes, essa queda nos valores de γ_{evap} não foi observada. Isso ocorre possivelmente devido aos valores de umidade relativa para esses experimentos, não ultrapassarem os 70 %, como mostram as Figuras 45 e 46, uma vez que esse comportamento foi observado na Figura 44 para valores de UR maiores que 70 %.

Como mostrado acima, para baixos valores de umidade relativa, o sistema evaporativo apresenta um melhor desempenho. Por esse motivo, essa técnica é recomendada para lugares secos, como por exemplo na região centro-oeste brasileira e para países de clima árido como em algumas regiões da Índia, onde Cheikh e Bouchair (2008) e Nahar, Sharma e Purohit (1999) realizaram estudos nessa área, e países de clima quente e seco, como Egito, onde Amer (2006) realizou estudos relacionados à essa técnica.

5.3.2 Consumo de Água

Um dos fatores relevantes na implementação de um sistema de resfriamento evaporativo é o consumo de água, que para algumas regiões do Brasil e do mundo pode ser escassa. Para se obter uma estimativa da quantidade de água consumida pelo sistema de resfriamento evaporativo proposto nesse trabalho, dados da massa de água no reservatório, ao longo do dia foram adquiridos através da balança e podem ser vistos na Figura 47.

Como o reservatório estava totalmente coberto, exceto por um pequeno orifício na tampa para manter a pressão ambiente, esses valores referem-se somente a evaporação através do material poroso, o qual já estava inicialmente umedecido. A Tabela 13 apresenta os dados de consumo total de água, ao longo dos testes ME/MS, o tempo de duração do experimento (Δt), a vazão mássica média (\dot{m}_{med}) e o fluxo volumétrico médio (Q''_{med}) calculados para cada experimento.

Para encontrar a vazão mássica de água evaporada ao longo do dia, utilizou-se a derivada com relação ao tempo para cada uma das curvas de consumo de água. Foi estipulado um intervalo de tempo de 10 minutos para o cálculo das derivadas.

A Tabela 13 mostrou que a menor vazão de água ocorreu no teste

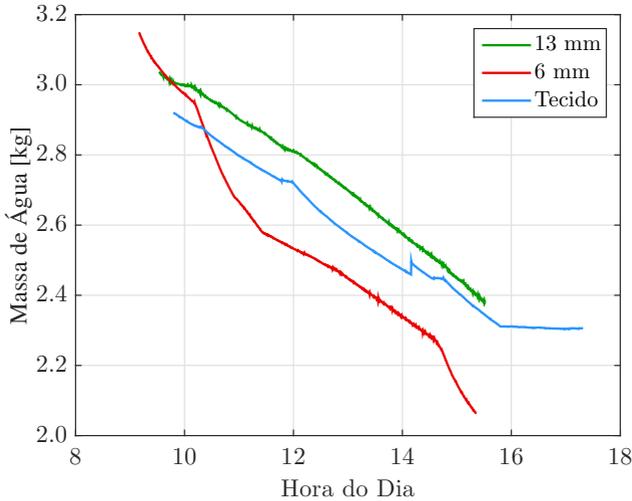


Figura 47 – Perda de massa de água ao longo do dia para os testes evaporativos

Tabela 13 – Consumo de água no decorrer dos testes evaporativos

Material	Massa de Água [kg]	Δt [s]	\dot{m}_{med} [kgs ⁻¹] x 10 ⁻⁵	Q''_{med} [Lh ⁻¹ m ⁻²]
13 mm	0,653	21480	3,04	0,75
6 mm	1,081	22200	4,87	1,20
Tecido	0,612	23220	2,64	0,65

realizado com o tecido de algodão, possivelmente devido ao fato de as propriedades intrínsecas do tecido, diferenciarem-se do material de fibra cerâmica.

Era esperado que o consumo de água para os dois testes realizados com o material de fibra cerâmica, onde na Tabela 13 são representados por "13 e 6 mm", apresentassem comportamento similar, por se tratarem do mesmo material poroso. A Figura 47 mostrou que para o intervalo de cerca de 12 à 14 horas, pode-se observar um perfil semelhante em ambas curvas. Já para o teste com o tecido de algodão, próximo das 14 horas, o gráfico mostra um ganho de massa, o que não ocorreu na prática, pois nenhuma massa de água foi adicionada ao reservatório. Isso ocorreu possivelmente devido à um erro de medição,

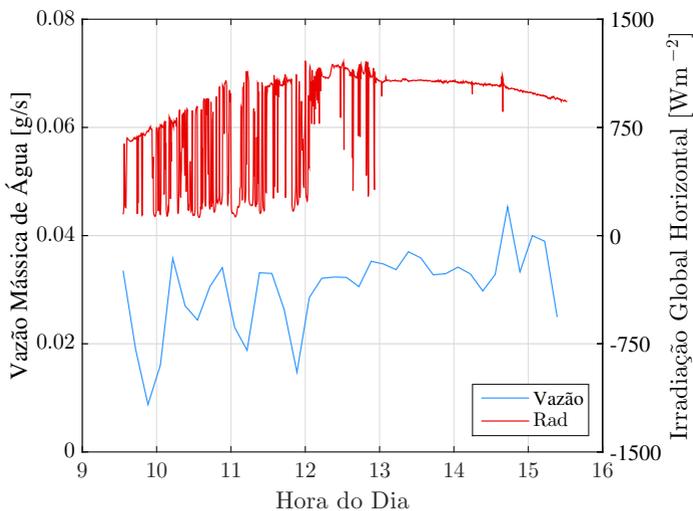


Figura 48 – Vazão mássica e irradiação solar horizontal obtidos ao longo do dia, para o teste realizado com o material de 13 mm de espessura

associado à abertura do reservatório para verificação do nível da água.

Para entender os comportamentos das curvas apresentadas na Figura 47, foi necessário avaliar a influência da radiação solar no decorrer dos experimentos.

As Figuras 48, 49 e 50 mostram a vazão mássica de água consumida e a irradiação global total incidente ao longo do dia, para os testes ME/MS com o material de fibra cerâmica com espessura de 13 mm, 6 mm e para o tecido de algodão respectivamente.

Pode-se observar, a partir das Figuras 48 e 49, que para os testes realizados com o material de fibra cerâmica, o intervalo de tempo entre 12 e 14 horas, a radiação incidente e as vazões mássicas para os ambos testes obtiveram valores e comportamentos semelhantes. Isso pode explicar o mesmo perfil dessas curvas, na Figura 47, o que deveria ocorrer durante o teste por se tratarem do mesmo material.

Porém para o período entre cerca de 9 até 12 horas, observou-se que a radiação para esses testes se comportou de maneira diferente, podendo-se observar muitas flutuações para esse período, no teste com o material de 13 mm de espessura como mostra a Figura 48. Já para o teste com o material de 6 mm de espessura, para esse período, a radi-

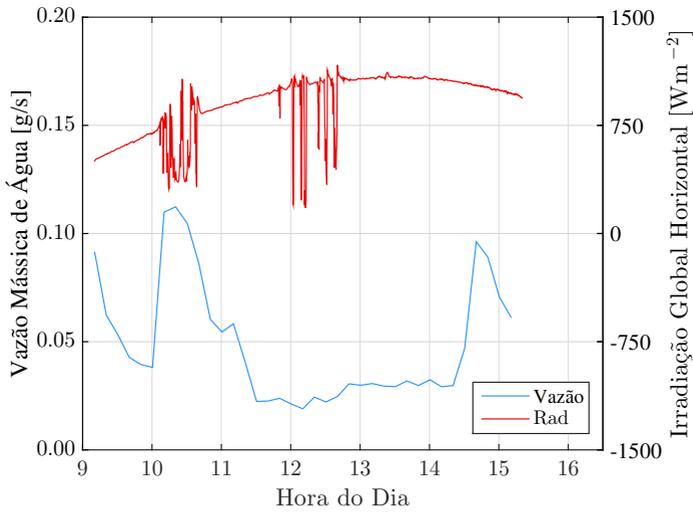


Figura 49 – Vazão mássica e irradiação solar horizontal obtidos ao longo do dia, para o teste realizado com o material de 6 mm de espessura

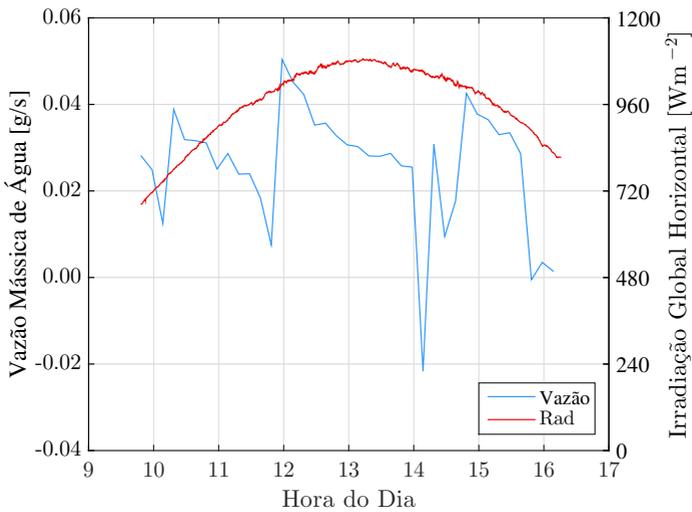


Figura 50 – Vazão mássica e irradiação solar horizontal obtidos ao longo do dia, para o teste realizado com o tecido de algodão

ação sofreu uma menor variação. Pode-se observar, na Figura 47, que esse intervalo de tempo, entre cerca de 9 à 12 horas, juntamente com o período próximo às 15 horas, foi onde observou-se a maior inclinação da curva para o teste de 6 mm de espessura. Esse período apresenta os maiores valores de vazão mássica da água, porém não coincide com o período onde a radiação atingiu os maiores valores durante o experimento, que ocorreu entre 13 e 14 horas, o que pode indicar que a taxa de evaporação sofre influência de outros fatores e não somente da radiação solar.

Isso fica mais evidente na Figura 50, onde, mesmo para valores diferentes de radiação, a vazão mássica de água, apresenta valores semelhantes, ao longo do teste, exceto pela vazão negativa que ocorreu possivelmente devido à erros de medição no momento em que se abriu o reservatório para verificação do nível de água.

Esse comportamento pode ser explicado por Lemon (1956), que estudou o processo de evaporação de um solo nu, um exemplo de meio poroso presente em nosso cotidiano. De acordo com esse autor, quando o material encontra-se completamente saturado, acontece o Estágio 1 da evaporação, o que ocorre no presente trabalho, devido ao fato de os materiais porosos estarem constantemente umedecidos. Nesse estágio, a evaporação depende das condições da atmosfera próxima ao solo, como temperatura, umidade do ar, velocidade do vento e taxa de radiação e pode ser caracterizado por uma taxa de evaporação constante e independente da umidade do meio poroso. O que pode ser observado nas Figuras 48, 49 e 50 em que as taxas de evaporação não variam muito ao longo do teste.

Dessa forma, pode-se constatar que a taxa de evaporação da água não é influenciada somente pela radiação, mas também por outros fatores, como umidade relativa, velocidade do vento, temperatura ambiente, entre outros, contrário ao que foi visto no trabalho de Crawford e da Silva (2014). O referido trabalho mostrou que quando a intensidade da lâmpada, utilizada para simular a radiação solar, aumenta, a taxa de evaporação na membrana (material poroso), também aumenta. Isso pode ter ocorrido devido à seção de testes do trabalho de Crawford e da Silva (2014) ter sido exposto à condições ambientais controladas em laboratório e não à condições reais ambientais.

Para se avaliar quantitativamente o calor retirado do sistema por meio da evaporação (q''_{evap}), foi utilizada a Equação 5.6, onde os valores de vazão mássica apresentados na Figura 50, no teste realizado para o tecido de algodão, foram utilizados.

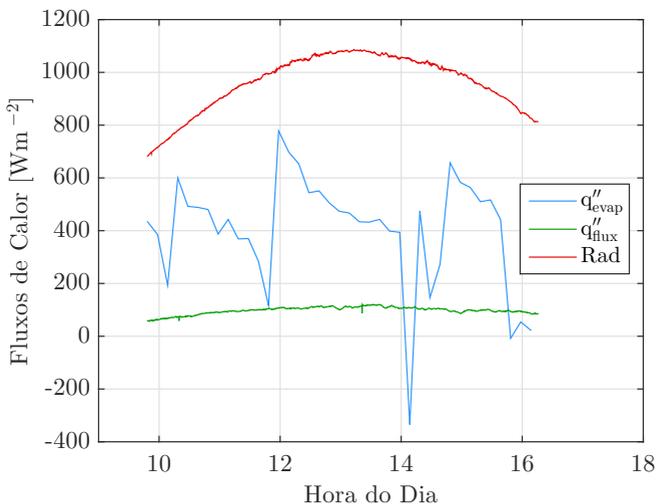


Figura 51 – Irradiação solar global, calor perdido por evaporação e calor transferido para o interior da cobertura, para o teste ME/MS com o tecido de algodão

$$q''_{evap} = \frac{\dot{m}h_{LV}}{A_{semi}}, \quad (5.6)$$

onde o calor de vaporização da água é de 2257 kJ/kg (ÇENGEL; BOLES, 2006) e a área do semidisco do material poroso (A_{semi}) é de aproximadamente 0,14 m².

A Figura 51 apresenta os valores de irradiação solar global (Rad), da quantidade de calor que atravessa a cobertura através da parte evaporativa, adquirida pelo fluxímetro F₂ (q''_{flux}), e o calor retirado do sistema por evaporação (q''_{evap}), obtido através dos dados de massa de água evaporada no teste.

Pode-se perceber que a parcela retirada do sistema através da evaporação é maior do que a parcela transferida para o interior da seção de testes, com exceção do valor negativo de fluxo, que ocorreu possivelmente devido à um erro de medição ocasionado pela abertura do reservatório. A soma dos valores de q''_{flux} e q''_{evap} é menor que o valor da radiação incidente, sendo essa diferença, possivelmente relacionada ao calor perdido no sistema, por convecção.

5.4 COMPARAÇÃO ENTRE AS TÉCNICAS DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO

Ao longo do trabalho, duas técnicas de resfriamento passivo foram apresentadas, a de isolamento térmico e de resfriamento evaporativo. Os efeitos térmicos dos sistemas de resfriamento passivo apresentados, foram verificados através das diferenças de temperatura e fluxo de calor entre as partes da cobertura compostas por esses sistemas e as utilizadas como referência.

Para o material de fibra cerâmica, de ambas espessuras, utilizouse os dados de temperatura e fluxo de calor obtidos nos testes ME/MS para a parte composta pelo material seco e evaporativo, enquanto os dados obtidos da parte exposta ao ambiente foram retirados do teste MS/SN. Para o tecido de algodão, os dados utilizados nesta análise, referem-se ao teste ME/MS, devido à sua espessura desprezível. Todos os valores foram obtidos quando a irradiação solar global atingiu 1000 Wm^{-2} .

Para os testes com o material de fibra cerâmica, as diferenças de temperatura (ΔT) foram calculadas, nessa ordem, entre os valores adquiridos nos termorresistores T_9 do teste MS/SN e T_9 e T_2 adquiridos no teste ME/MS, para isolamento térmico (MS) e resfriamento evaporativo (ME), respectivamente. As diferenças entre os fluxos de calor ($\Delta q''$) foram obtidas através da diferença, nesta ordem, dos dados obtidos nos transdutores F_5 , para o teste MS/SN e F_5 F_2 adquiridos no teste ME/MS, para isolamento térmico (MS) e resfriamento evaporativo (ME) respectivamente.

Para o teste com o tecido de algodão, as diferenças de temperatura e fluxo de calor foram calculados através dos valores obtidos no teste ME/MS, onde a parte coberta pelo tecido seco (MS) foi representada pelos sensores T_9 e F_5 e a parte composta pelo sistema evaporativo (ME) pelos sensores T_2 e F_2 . Os valores de ΔT e $\Delta q''$ foram calculados a partir das Equações 5.1 e 5.2 respectivamente, e os valores dos fatores calculados a partir das Equações 5.3, 5.4 e 5.5.

A Tabela 14 apresenta as diferenças de temperatura e fluxo de calor, e os fatores obtidos entre a parte composta pelo sistema de resfriamento passivo e a parte utilizada como referência, que para a fibra cerâmica foi a parte exposta ao ambiente, e para o tecido foi esse mesmo material seco. Os valores utilizados foram retirados no momento em que a irradiação solar global atingiu 1000 Wm^{-2} .

As reduções de temperatura encontradas para a técnica de isolamento térmico, foram maiores que as encontradas por Amer (2006),

Tabela 14 – Diferenças de temperatura, fluxo de calor e valores do fator para as técnicas estudadas, obtidos para o valor de irradiação solar global de 1000 Wm^{-2}

Técnica	Material	ΔT [°C]	$\Delta q''$ [Wm ⁻²]	γ
Isolamento Térmico	13 mm	11,1	204,7	12,6
Isolamento Térmico	6 mm	14,4	190,2	5,8
Resfriamento Evaporativo	13 mm	10,1	200,3	10,1
Resfriamento Evaporativo	6 mm	12,0	182,2	4,8
Resfriamento Evaporativo	Tecido	2	29,9	1,3

que utilizou 5 cm de lã de rocha ($k=0,04 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$) sobre a cobertura de uma célula de testes e teve sua temperatura interna reduzida em média $7 \text{ }^\circ\text{C}$ se comparada ao protótipo sem o isolamento.

Para um valor de irradiação solar global de 1000 Wm^{-2} , os resultados encontrados no presente trabalho, quando utiliza-se o material de fibra cerâmica nas duas espessuras, foram mais significativos no que se refere à redução de carga térmica transferida para o interior das edificações do que os obtidos nos trabalhos selecionados na Seção 2.2. Nahar, Sharma e Purohit (1999) e Amer (2006) encontraram reduções de 10 e $9,6 \text{ }^\circ\text{C}$, respectivamente, para as temperaturas internas das células de testes se comparada àquelas sem o sistema sobre a cobertura. As reduções de temperatura encontradas por esses autores, além de não utilizarem materiais porosos, ocorreram no clima árido de Juhpur na Índia e no clima quente e seco de Monouifia, Egito. Teixeira e Labaki (2006), por sua vez, realizaram os estudos para o clima subtropical, em Campinas, Brasil, onde o sistema de resfriamento evaporativo, composto por microaspersores de água, reduziu em até $7,6 \text{ }^\circ\text{C}$ a temperatura interna. A redução de temperatura encontrada por Ghosal, Tiwari e Srivastava (2003), de $6 \text{ }^\circ\text{C}$, também ficou abaixo da encontrada para o material de fibra cerâmica.

Porém se os resultados dos trabalhos mencionados acima, forem comparados com os obtidos pelo tecido de algodão evaporativo, eles possuem um melhor desempenho, uma vez que como visto na Seção 5.3, quando utiliza-se o tecido, a máxima redução de temperatura en-

contrada foi de 3,1 °C, e para o valor de irradiação de 1000 Wm⁻² a redução foi de 2,0 °C. Entretanto, apesar de possuir um menor desempenho quando se utiliza o tecido de algodão, essa técnica apresenta a vantagem da não utilização de trabalho mecânico, diferindo-se dos demais estudos, que necessitam de equipamentos elétricos para auxiliar no escoamento da água através dos sistemas evaporativos.

O estudo realizado por Crawford e da Silva (2014), onde o resfriamento evaporativo ocorreu através de uma membrana porosa, mostrou que para determinadas condições do experimento, a membrana seca, necessitou de uma menor carga de refrigeração do que a membrana evaporativa. Resultado semelhante ao encontrados nesse estudo para o material de fibra cerâmica, quando o meio poroso seco obteve uma melhor performance em relação ao evaporativo, no que se refere à redução da transferência de calor através da cobertura.

No estudo realizado por Kuehni et al. (2016) as temperaturas das coberturas compostas pelos materiais porosos, neste caso areia com diferentes tamanhos de poros, ficou, durante algumas horas do experimento, igual ou até mesmo maior do que a temperatura da cobertura de referência. Já no presente trabalho, para o tecido de algodão, a temperatura da parte composta pelo sistema evaporativo (T₂), fica sempre abaixo da parte utilizada como referência (T₉), ou seja, no presente trabalho o sistema evaporativo com o tecido de algodão, apresentou uma melhor performance, onde sua temperatura fica, durante todo o experimento abaixo da parte utilizada como referência.

Cabe salientar que quanto menor a espessura do meio poroso, menor é a sua capacidade de transportar água por potencial de sucção, exigindo portanto, maior investimento em rede de distribuição via dutos ou meios porosos auxiliares. Outro aspecto não analisado neste trabalho, é o problema do crescimento de microrganismos (fungos e bactérias) e plantas sobre o material poroso.

5.5 COMPARAÇÃO TEÓRICO-EXPERIMENTAL

As equações apresentadas no Capítulo 4 foram introduzidas no software EES (*Engineering Equation Solver*) com o objetivo de calcular o valor do fluxo de calor transferido para o interior da cobertura para as três situações estudadas nesse trabalho: sem o sistema de resfriamento passivo (q''_{SN}), com o meio poroso seco (q''_{MS}) e evaporativo (q''_{MS}) dispostos sobre a cobertura.

Os dados de entrada necessários para a simulação foram a absor-

tividade (α), a condutividade térmica (k), o raio (R) e a espessura (δ) do material exposto à radiação solar. As condições de contorno foram a radiação incidente na superfície (G), a temperatura ambiente (T_{amb}), a temperatura interna (T_{int}) e a velocidade do vento (v), que foram adquiridas ao longo de cada teste, a cada 15 segundos.

Devido à velocidade do vento oscilar bruscamente durante o dia, os dados obtidos não foram utilizados como os demais, a cada 15 segundos, sendo necessário realizar uma média a cada 10 minutos de aquisição de dados, conforme sugerido pela norma internacional IEC-61400-12-1 - *Power Performance Measurements of Electricity Producing Wind Turbines*.

Devido ao fato de o anemômetro utilizado na bancada experimental realizar a aquisição de dados da velocidade do vento nas três direções, para os cálculos, foram utilizados somente os valores absolutos na direção horizontal, calculados através da Equação 3.1.

Nas simulações para o modelo evaporativo (ME), além das condições de contorno citadas acima, também foi introduzida a vazão mássica da água evaporada (\dot{m}), adquirida durante os testes evaporativos, a qual também foi utilizada como uma média a cada 10 minutos de dados.

Os valores de T_{int} foram obtidos através dos termorresistores T_2 e T_9 , onde para os testes MS/SN, as leituras do sensor T_2 equivalem a parte coberta pelo meio poroso (MS) e do sensor T_9 a parte exposta ao ambiente (SN). Para os testes ME/MS, as leituras do termorresistor T_2 equivalem a parte coberta pelo material evaporativo (ME) enquanto as do T_9 a parte coberta pelo material seco (MS).

Os valores de massa específica (ρ), viscosidade dinâmica (μ), condutividade (k) e do número de *Prandtl* (Pr) para o ar, foram calculados para a temperatura ambiente a cada passo da simulação.

As Figuras 52 e 53 mostram os fluxos de calor ao longo do dia obtidos experimentalmente e teoricamente, para os testes MS/SN e ME/MS, realizados com o material de fibra cerâmica de 13 mm de espessura, enquanto as Figuras 54 e 55, mostram para o material de fibra cerâmica de 6 mm de espessura.

Os subscritos ME, MS e SN referem-se, nessa ordem, a parte da cobertura composta pelo material poroso evaporativo, pelo material seco e a parte da cobertura exposta ao ambiente, e os subscritos “exp” e “sim” referem-se aos dados experimentais e simulados, respectivamente.

Como pode ser visto nas Figuras 52 e 54 para os testes MS/SN com os materiais de fibra de cerâmica, as curvas simuladas apresentam desvio com relação à curva experimental, porém com perfis semelhantes,

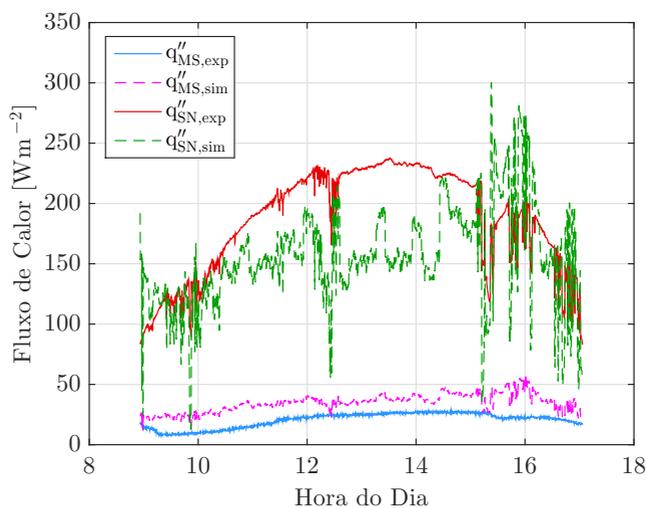


Figura 52 – Resultado experimental versus simulado para o teste MS/SN com o material de 13 mm de espessura

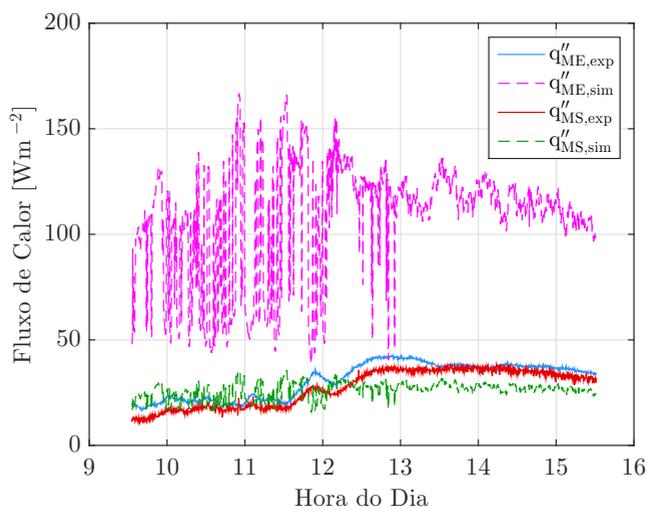


Figura 53 – Resultado experimental versus simulado para o teste ME/MS com o material de 13 mm de espessura

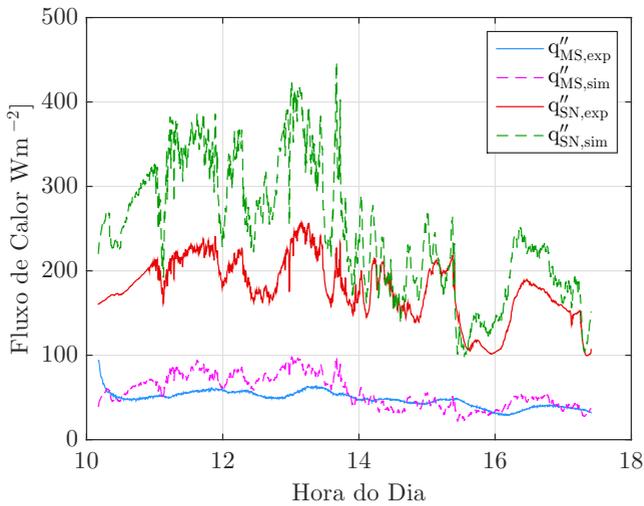


Figura 54 – Resultado experimental versus simulado para o teste MS/SN com o material de 6 mm de espessura

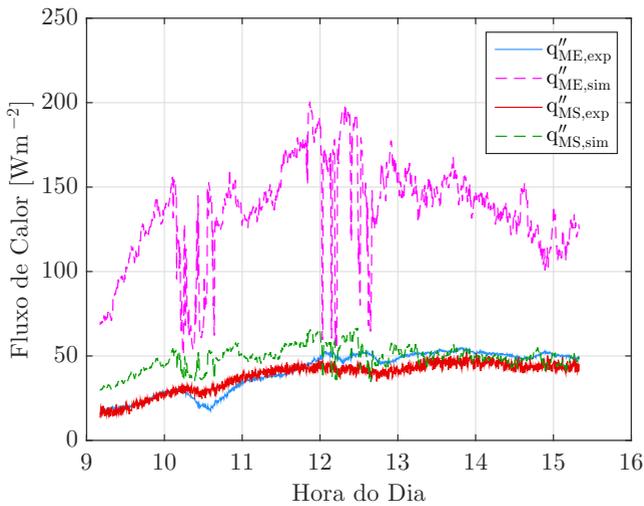


Figura 55 – Resultado experimental versus simulado para o teste ME/MS com o material de 6 mm de espessura

além de apresentarem mesma ordem de grandeza. O mesmo comportamento acontece para a parte não evaporativa (MS), dos testes ME/MS apresentados nas Figuras 53 e 55, ou seja os resultados simulados e experimentais apresentam mesmo perfil e ordem grandeza. Porém para a parte evaporativa (ME), os resultados simulados apresentam desvios de ordem de grandeza superior aos adquiridos experimentalmente, além de não apresentarem o mesmo perfil. Isso pode ocorrer possivelmente devido à parcela de calor latente adicionado nas equações de balanço de energia, a qual depende da vazão mássica de água, obtida experimentalmente. A balança utilizada para se adquirir os valores de massa perdida por evaporação, é de alta precisão, sendo sensível à vibrações. Durante os dias de experimento, ocorreram obras da duplicação da rua em frente à universidade, e pode-se sentir a estrutura, sobre a qual foi montado o experimento, vibrar, ocasionando possíveis erros de medição. Além disso a vazão mássica foi adicionada como uma média de 10 minutos. Tentou-se utilizar intervalos de tempo maiores como 30 e 60 minutos, assim como a vazão calculada a cada 15 segundos, porém os resultados simulados ficaram ainda mais distantes do que este para 10 minutos.

Já para os testes realizados com tecido de algodão as curvas experimentais e teóricas apresentaram perfis muito distintos como pode ser visto nas Figuras 56 e 57.

A parte evaporativa simulada para esse teste também foi a que apresentou um maior desvio com relação à experimental, possivelmente devido as medições da vazão mássica, como mencionado acima.

A Tabela 15 mostra o erro quadrático médio (RMSE), calculado entre os valores teóricos e experimentais, para os testes ME/MS e MS/SN para o material de fibra cerâmica de 13 e 6 mm de espessura, e para o tecido.

Tabela 15 – Erro quadrático médio (RMSE), entre os valores teóricos e experimentais, para os testes ME/MS e MS/SN

	Testes ME/MS		Testes MS/SN	
	ME	MS	MS	SN
13 mm	80,85	7,96	50,70	15,20
6 mm	97,89	12,73	16,90	84,06
Tecido	104,26	32,52	66,21	65,17

Outra razão para os desvios encontrados pode estar associado à parcela convectiva do modelo, devido ao fato de não se ter encontrado na literatura um valor do número de Nusselt para o fenômeno e a geo-

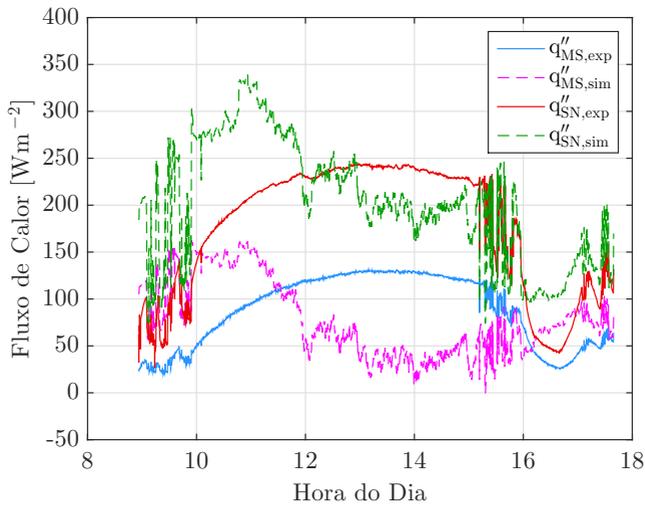


Figura 56 – Resultado experimental versus simulado para o teste MS/SN com o tecido de algodão

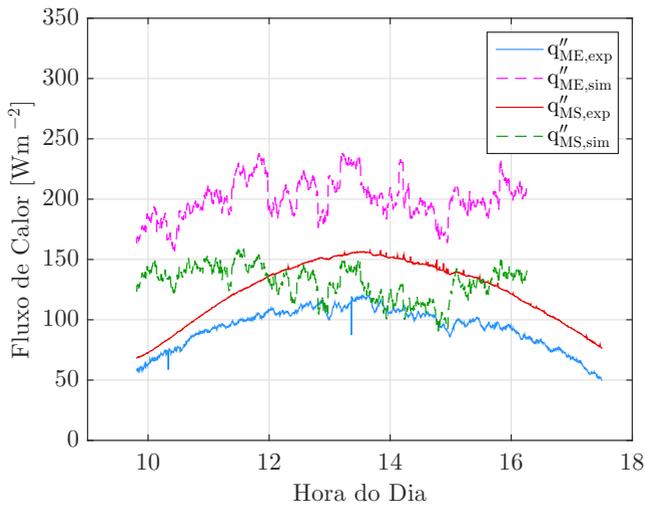


Figura 57 – Resultado experimental versus simulado para o teste ME/MS com o tecido de algodão

metria utilizada nesse trabalho. O coeficiente de convecção no modelo é obtido através da aproximação de placa plana, com escoamento unidirecional, e sabe-se que os valores de velocidade do vento adquiridos ao longo dos experimentos e utilizados como condições de contorno na simulação, foram obtidos nas três direções. Mesmo com o tratamento dos dados para ser utilizado na direção horizontal, sabe-se que a velocidade do vento não é unidirecional, e que deveria ser quando se utiliza o modelo de placa plana.

Além disso, o modelo desconsidera a transferência de calor radial ao longo da cobertura (polipropileno) e ao longo dos materiais porosos.

Outra razão para os desvios encontrados, foi a falta de um modelo capacitivo transiente, associado à inércia térmica do sistema, uma vez que o modelo foi implementado em regime permanente, apesar de as condições de contorno variarem no tempo.

Dessa forma, os modelos teóricos apresentados não são adequados para as situações apresentadas nesse trabalho.

6 CONCLUSÕES

A bancada experimental construída neste trabalho teve como objetivo avaliar, em condições reais, a redução da transferência de calor em coberturas por meio da disposição de um sistema de resfriamento passivo, a temperatura constante. Para isso, dados de temperatura interna, fluxo de calor, irradiação solar horizontal, velocidade do vento, temperatura ambiente e umidade relativa foram adquiridos, durante dias típicos de verão na cidade de Florianópolis.

O resfriamento evaporativo estudado neste trabalho, ocorreu por meio de dois diferentes materiais porosos, que possuíam características capilares capazes de realizar o bombeamento passivo e auto regulável sem a utilização de trabalho mecânico, como proposto.

Entre os materiais estudados no presente trabalho, a disposição do meio poroso seco, de maior espessura, sobre a cobertura foi o que apresentou os melhores resultados, no que se refere a diminuição de fluxo térmico transferido para o interior de edificações. Para um valor de radiação incidente de 1000 Wm^{-2} , o material poroso de 13 mm, conseguiu reduzir a carga térmica transferida para o interior de uma cobertura, aproximadamente 12 vezes quando seco e 10 vezes quando umedecido, se comparados à uma cobertura exposta.

O tecido de algodão, por não possuir resistência térmica associada, devido à sua baixa espessura, foi mais eficiente quando umedecido do que quando seco, contrário ao que foi visto para a fibra cerâmica que apresentou melhor desempenho quando seco, devido à sua capacidade de isolamento térmico.

Constatou-se que quando a umidade relativa aumenta, o fator do sistema evaporativo diminui, o que indica que essa técnica apresentaria um melhor desempenho em locais de clima seco.

O consumo de água total no experimento realizado com o tecido de algodão, foi de aproximadamente $0,65 \text{ Lh}^{-1}\text{m}^{-2}$, o que não torna o custo com água na implementação de um sistema evaporativo tão significativo.

Os modelos teóricos apresentados nesta pesquisa, divergiram significativamente dos valores experimentais.

6.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Construir um trocador de calor capaz de manter a temperatura interna da seção de testes mais homogênea, não permitindo que seus canais de água influenciem nos dados adquiridos pelos sensores, como acontece neste trabalho.

Estudar a aplicação de outro materiais porosos no sistema evaporativo proposto.

Testar materiais porosos que, quando molhados, não alterem significativamente suas propriedades térmicas de absorvidade e condutividade, para que na comparação entre sua performance seca e molhada consiga se avaliar mais claramente os efeitos da evaporação sobre a diminuição de temperatura de cobertura.

Utilizar um modelo teórico que se adeque às condições experimentais produzidas neste trabalho, encontrando um coeficiente de convecção mais apropriado ao fenômeno e geometria utilizados, e também, adicionando ao modelo os efeitos capacitivos e de transferência de massa através do material poroso.

Avaliar através de resultados experimentais e simulações, o desempenho do material poroso em relação ao resfriamento noturno em climas quentes.

Avaliar os efeitos da altura do reservatório, no bombeamento passivo de água para o material poroso.

Analisar o problema do crescimento de microrganismos (fungos e bactérias) e plantas sobre o material poroso.

Realizar os testes em paralelo, com dois dispositivos diferentes.

REFERÊNCIAS

- AL-TURKI, A.; ZAKI, G. Energy saving through intermittent evaporative roof cooling. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 17, n. 1, p. 35–42, 1991.
- AMER, E. H. Passive options for solar cooling of buildings in arid areas. *Energy*, Elsevier, v. 31, n. 8, p. 1332–1344, 2006.
- ASHRAE. Handbook of fundamentals. *American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers*, New York, USA, 2005.
- BELARBI, R.; GHIAUS, C.; ALLARD, F. Modeling of water spray evaporation: Application to passive cooling of buildings. *Solar energy*, Elsevier, v. 80, n. 12, p. 1540–1552, 2006.
- BERGMAN, T. L.; INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; LAVINE, A. S. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa - 7ª edição*. Rio de Janeiro: LTC, 2014.
- CAMARGO, J. *Sistemas de resfriamento evaporativo e evaporativo-adsortivo aplicados ao condicionamento de ar*. Tese (Doutorado) — Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista-Guaratinguetá, 2003.
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. *Termodinâmica. 5ª edição*. São Paulo: Mc Graw Hill, 2006.
- CHEIKH, H. B.; BOUCHAR, A. Passive cooling by evapo-reflective roof for hot dry climates. *Renewable Energy*, Elsevier, v. 29, n. 11, p. 1877–1886, 2004.
- CHEIKH, H. B.; BOUCHAR, A. Experimental studies of a passive cooling roof in hot arid areas. *The Open Fuels & Energy Science Journal*, v. 1, n. 1, 2008.
- CRAWFORD, R.; DA SILVA, A. K. Experimental testing of a passive, evaporation-based roof cooling system. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 71, p. 12–19, 2014.
- CRAWFORD, R.; MURPHY, T. E.; BERBEROGLU, H.; SILVA, A. K. da. Pumpless evaporative cooling of actively heated surfaces. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 62, p. 217–221, 2013.

ELETROBRÁS. *Avaliação do Mercado de Eficiência Energética no Brasil - Sumário executivo - Ano base 2005*. 2009. <<http://www.procelinfo.com.br/>>. Acessado em 13/07/2016.

EPE. *Nota Técnica DEA 10/14 - Consumo de Energia no Brasil Análises Setoriais 2014*. Rio de Janeiro, Junho 2014.

EPE. *Nota Técnica DEA 13/14 - Demanda de Energia 2050*. Rio de Janeiro, Agosto 2014.

GEETHA, N.; VELRAJ, R. Passive cooling methods for energy efficient buildings with and without thermal energy storage—a review. *Energy Education Science and Technology Part A: Energy Science and Research*, v. 29, n. 2, p. 913–946, 2012.

GHOSAL, M.; TIWARI, G.; SRIVASTAVA, N. Modeling and experimental validation of a greenhouse with evaporative cooling by moving water film over external shade cloth. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 35, n. 8, p. 843–850, 2003.

GUIMARÃES, L. G. M. *Modelagem e construção de protótipo de refrigerador por absorção de vapor de baixa potência operando com o par água-brometo de lítio e utilizando fontes térmicas de baixa temperatura*. Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-graduação em Engenharia de Energia da Universidade Federal de São João Del Rei, 2011.

GÜTHS, S.; NICOLAU, V. P. *Instrumentação em Ciências Térmicas*. Florianópolis, 2014.

GÜTHS, S.; PHILIPPI, P.; GAVIOT, E.; THERY, P. Um transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial. *Anais do XI Congresso Brasileiro em Engenharia Mecânica (COBEM)*, Belo Horizonte, 1995.

KUEHNI, S. M.; BOU-ZEID, E.; WEBB, C.; SHOKRI, N. Roof cooling by direct evaporation from a porous roof layer. *Energy and Buildings*, Elsevier, 2016.

LAMBERTS, R. *Desempenho térmico de coberturas leves com ático: bancada de testes e modelo matemático*. Dissertação (Mestrado) — Curso de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1983.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. *Eficiência energética na arquitetura - 3ª edição*. Rio de Janeiro: ELETROBRAS/PROCEL, 2014.

- LAWRENCE BERKELEY NATIONAL LABORATORY. *Cool Roofing Materials Database*. 2000. <<http://energy.lbl.gov/coolroof/>>. Acessado em 11/05/2016.
- LEMON, E. R. The potentialities for decreasing soil moisture evaporation loss. *Soil Science Society of America Journal*, Soil Science Society of America, v. 20, n. 1, p. 120–125, 1956.
- MENG, Q.; HU, W. Roof cooling effect with humid porous medium. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 37, n. 1, p. 1–9, 2005.
- NAHAR, N.; SHARMA, P.; PUROHIT, M. Studies on solar passive cooling techniques for arid areas. *Energy Conversion and Management*, Elsevier, v. 40, n. 1, p. 89–95, 1999.
- NAHAR, N.; SHARMA, P.; PUROHIT, M. Performance of different passive techniques for cooling of buildings in arid regions. *Building and Environment*, Elsevier, v. 38, n. 1, p. 109–116, 2003.
- PIRES, L.; SILVA, P. D.; GOMES, J. C. Performance of textile and building materials for a particular evaporative cooling purpose. *Experimental Thermal and Fluid Science*, Elsevier, v. 35, n. 4, p. 670–675, 2011.
- PORUMB, B.; UNGUREȘAN, P.; TUTUNARU, L. F.; ȘERBAN, A.; BĂLAN, M. A review of indirect evaporative cooling technology. *Energy Procedia*, Elsevier, v. 85, p. 461–471, 2016.
- RAEISSI, S.; TAHERI, M. Cooling load reduction of buildings using passive roof options. *Renewable energy*, Elsevier, v. 7, n. 3, p. 301–313, 1996.
- RINCÓN, J.; ALMAO, N.; GONZÁLEZ, E. Experimental and numerical evaluation of a solar passive cooling system under hot and humid climatic conditions. *Solar Energy*, Elsevier, v. 71, n. 1, p. 71–80, 2001.
- SABZI, D.; HASELI, P.; JAFARIAN, M.; KARIMI, G.; TAHERI, M. Investigation of cooling load reduction in buildings by passive cooling options applied on roof. *Energy and Buildings*, Elsevier, v. 109, p. 135–142, 2015.
- SODHA, M.; KUMAR, A.; SINGH, U.; TIWARI, G. Periodic theory of an open roof pond. *Applied Energy*, Elsevier, v. 7, n. 4, p. 305–319, 1980.

TEIXEIRA, C. F. B.; LABAKI, L. C. Evaporative cooling in tropical climate: Case study of campinas, brazil. *Proceedings of 23rd Conference on Passive and Low Energy Architecture—PLEA*, v. 2006, p. 887–892, 2006.

TEIXEIRA, C. F. B.; LABAKI, L. C. Springtime monitoring of passive cool roofs in subtropical climate. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, David Publishing Company, Inc., v. 8, n. 11, 2014.

WANPHEN, S.; NAGANO, K. Experimental study of the performance of porous materials to moderate the roof surface temperature by its evaporative cooling effect. *Building and Environment*, Elsevier, v. 44, n. 2, p. 338–351, 2009.

APÊNDICE A - Caracterização dos Materiais Porosos

A.1 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

A Figura 58 mostra um esquema do dispositivo empregado nos ensaios. A resistência térmica do material pode ser determinada a partir da Lei de Fourier:

$$R = \frac{T_1 - T_2}{\frac{q}{A}} \quad (\text{A.1})$$

Onde R é a resistência térmica (m^2KW^{-1}), q é o fluxo de calor médio medido pelos fluxímetros que se encontram acima e abaixo da amostra, e T_1 e T_2 as temperaturas médias nas superfícies da amostra.

Considerando que a amostra é homogênea e conhecendo sua espessura (δ) é possível determinar a condutividade térmica do material (k):

$$k = \frac{\delta}{R} \quad (\text{A.2})$$

Cada amostra submetida ao ensaio possuía as dimensões de **100 x 100 mm**. A temperatura média de cada ensaio foi de **25 °C**.

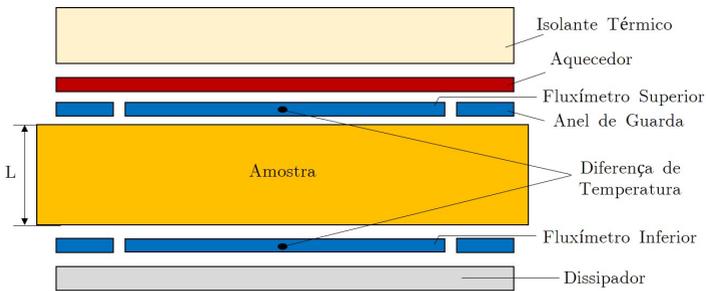


Figura 58 – Princípio do método de mediação da resistência térmica

APÊNDICE B – Calibração dos Sensores

B.1 TERMORRESISTORES DO TIPO PT100

A calibração dos 10 termorresistores do tipo PT100 foi realizada por meio da fonte calibração CL 134, da marca OMEGA, onde os sensores foram calibrados a partir de uma temperatura de referência gerada pelo calibrador. Foram realizadas 100 medições para cada uma das temperaturas de referência. A média dos valores adquiridos na calibração dos termorresistores do tipo PT100 são apresentados nas tabelas 16 e 17 e o valor dos desvios padrão para as medições realizadas, é apresentados na tabela 18.

Tabela 16 – Média dos valores adquiridos na calibração dos termorresistores tipo PT100 01, 02, 03, 04 e 06.

$T_{\text{ref}} [^{\circ}\text{C}]$	01	02	03	04	06
5,0	5,69	5,47	5,24	4,95	6,16
10,0	10,58	10,41	10,26	10,04	10,89
15,0	15,35	15,24	15,15	15,01	15,49
19,0	19,08	19,03	18,98	18,90	19,12
30,1	29,83	30,10	29,74	29,68	29,68
35,0	34,56	34,97	34,42	34,38	34,35
40,2	39,62	40,15	39,41	39,41	39,35
45,0	44,21	44,90	43,99	43,97	43,92
50,0	49,06	49,85	48,83	48,82	48,74
55,0	53,88	54,80	53,63	53,62	53,50
60,0	58,79	59,76	58,52	58,52	58,38

Como pode ser observado a partir dos dados da tabela acima, os valores de desvio padrão foram muito próximos, sendo 0,06 o maior deles. Para facilitar os cálculos, este será o valor considerado no cálculo da incerteza de medição de todos os dos termorresistores do tipo PT100. A incerteza combinada é uma junção da influência das diferentes fontes de incerteza, e pode ser estimada a partir da incerteza padronizada de cada fonte erro:

$$u_c = \sqrt{(u_1^2 + u_2^2)} \quad (\text{B.1})$$

Como comentado acima, considera-se o erro associado à medição no momento da calibração igual ao maior desvio padrão, dessa forma $u_1 = 0,06^{\circ}\text{C}$. Sabendo que a incerteza gerada pelo calibrador é de $\pm 0,05^{\circ}\text{C}$ (u_2), a incerteza de medição combinada para o PT100 fica então igual a $\pm 0,08^{\circ}\text{C}$.

Devido ao fato de o formato da curva "temperatura lida no sen-

Tabela 17 – Média dos valores adquiridos na calibração dos termorresistores tipo PT100 07, 08, 09, 10 e 11

$T_{\text{ref}} [^{\circ}\text{C}]$	07	08	09	10	11
5,0	5,87	5,16	5,20	5,86	5,62
10,0	10,72	10,21	10,25	10,69	10,53
15,0	15,42	15,14	15,16	15,38	15,32
19,0	19,11	18,99	19,01	19,06	19,07
30,1	29,76	30,22	30,20	30,16	30,16
35,0	34,47	35,14	35,12	35,08	35,06
40,2	39,49	40,37	40,35	40,30	40,28
45,0	44,11	45,20	45,18	45,13	45,10
50,0	48,95	50,19	50,18	50,12	50,08
55,0	53,75	55,18	55,17	55,11	55,06
60,0	58,63	60,16	60,14	60,08	60,02

Tabela 18 – Erros aleatórios para os valores adquiridos na calibração dos termorresistores do tipo PT100.

$T_{\text{ref}} [^{\circ}\text{C}]$	01	02	03	04	06	07	08	09	10	11
5,0	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02
10,0	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02
15,0	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03	0,03
19,0	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02
30,1	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,02	0,02
35,0	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	0,04	0,04	0,03
40,2	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02
45,0	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02	0,03	0,03	0,03	0,02
50,0	0,04	0,04	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,05	0,04	0,04
55,0	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,02
60,0	0,05	0,03	0,05	0,06	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03

onde x "temperatura de referência gerada pelo calibrador" para os termorresistores calibrados ser uma reta e os dados adquiridos a partir desses sensores serem muito próximos, a figura 59 mostra apenas a curva característica para o sensor 01. As equações para os 10 termorresistores são apresentadas na tabela 19, onde X é o valor de temperatura lida pelo sensor e Y é a correção dessa temperatura de acordo com a temperatura de referência gerada pelo calibrador.

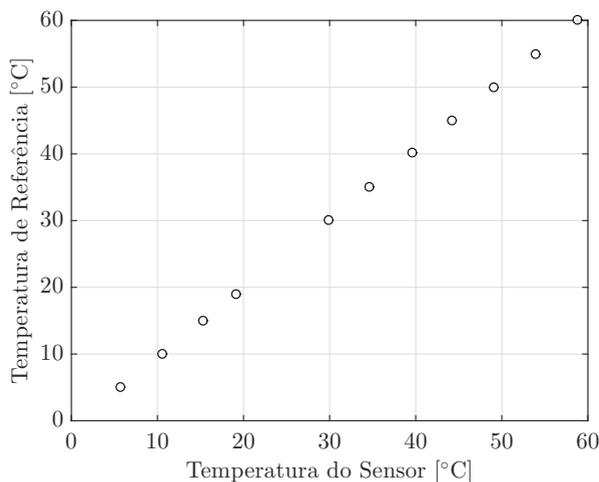


Figura 59 – Curva característica para o termorresistor 01

B.2 TERMOPARES DO TIPO E

O mesmo procedimento de calibração descrito para os termorresistores foi adotado para os termopares do tipo E. A tabela 20 mostra a média dos valores adquiridos e os erros aleatórios para as medições.

Seguindo o mesmo procedimento anterior, considera-se o erro associado à medição no momento da calibração igual ao maior desvio padrão, dessa forma $u_1 = 0,67^\circ\text{C}$. Sabendo que a incerteza gerada pelo calibrador é de $\pm 0,05^\circ\text{C}$ (u_2), a incerteza de medição combinada para o termopar fica então igual a $\pm 0,67^\circ\text{C}$. A figura 60 mostra os pontos experimentais obtidos na calibração para os dois termopares, enquanto a tabela 21 apresenta as equações para os 2 termopares, onde

Tabela 19 – Equações características de calibração para os 10 termorresistores do tipo PT100

Sensor	Equação Característica
01	$Y = 1,0371X - 0,8841$
02	$Y = 1,012X - 0,4341$
03	$Y = 1,0357X - 0,6077$
04	$Y = 1,0309X - 0,3661$
06	$Y = 1,053X - 1,3252$
07	$Y = 1,0435X - 1,0611$
08	$Y = 0,9991X - 0,1219$
09	$Y = 1,0002X - 0,1595$
10	$Y = 1,011X - 0,6108$
11	$Y = 1,009X - 0,4814$

Tabela 20 – Média e desvio padrão dos valores adquiridos na calibração dos termopares tipo E

$T_{ref} [^{\circ}C]$	01	02	σ_{01}	σ_{02}
5,0	6,27	5,00	0,05	0,66
10,0	10,57	9,91	0,07	0,67
15,0	15,04	14,71	0,08	0,62
19,0	18,32	18,29	0,08	0,64
30,1	29,81	29,93	0,06	0,26
35,0	34,59	34,85	0,07	0,25
40,2	39,68	40,09	0,08	0,28
45,0	44,37	44,88	0,06	0,33
50,0	49,25	49,89	0,06	0,40
55,0	54,08	54,88	0,07	0,27
60,0	58,94	59,89	0,06	0,35

X é o valor de temperatura lida pelo sensor e Y é a correção dessa temperatura de acordo com a temperatura de referência gerada pelo calibrador.

B.3 CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE FLUXO DE CALOR

A calibração dos transdutores de fluxo de calor foi realizada pelo "Método do Fluxímetro Auxiliar", conforme Güths e Nicolau (2014). Esse método consiste na utilização de uma placa isotérmica, como fonte de temperatura fria, uma resistência elétrica e e um fluxímetro já cali-

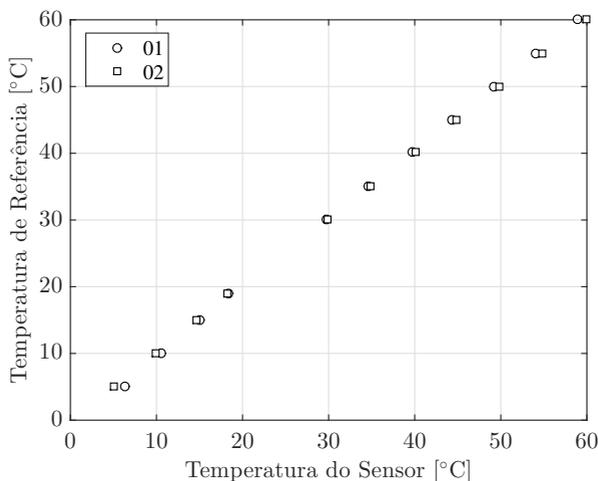


Figura 60 – Dados obtidos na calibração dos termopares tipo E

Tabela 21 – Equações características de calibração para os termopares tipo E

Sensor	Equação Característica
01	$Y = 1,0324X - 0,7542$
02	$Y = 0,9977X + 0,2566$

brado, chamado auxiliar, utilizado par registrar o fluxo que está "escapando", uma vez que o sistema está isolado. O fluxo de calor lido no fluxímetro que está sendo calibrado é igual a diferença entre a potência dissipada pela resistência e o fluxo de calor lido no fluxímetro auxiliar.

Para as calibrações, foi utilizada uma resistência térmica de $20,142 \Omega$ e $0,12775 m^2$. De acordo com medições previamente realizadas, sabe-se que a curva característica (Tensão no Fluxímetro x Potência) para os transdutores de fluxo de calor é uma reta. Por esse motivo a calibração para os 4 fluxímetros foi realizada com apenas uma ponto. A Tabela 22 mostra os valores de tensão lida no transdutor para a potência líquida, ou seja a potência que atravessa o transdutor e dessa forma obtém-se as constantes de calibração em $(W/m^2)/\mu V$.

Tabela 22 – Constante de calibração para os transdutores de fluxo de calor

Transdutor	Fluxo líquido [W/m^2]	Sinal [μV]	C [$(\text{W}/\text{m}^2)/\mu\text{V}$]
1	129,36	583,30	0,221778
2	129,36	190,00	0,680861
3	139,14	338,00	0,411671
4	128,37	427,05	0,30067

APÊNDICE C - Correção do *Off-set*

Devido ao fato de os sensores de temperatura e fluxo de calor estarem posicionados em diferentes locais ao longo da cobertura, os canais d'água no trocador de calor (quente e frio) podem influenciar nos valores dos dados obtidos através deles. Por esse motivo foi realizado um ajuste no *off-set* do sistema. Para isso foi necessário a realização de um teste, no período noturno, onde há somente a influência dos canais de água fria e quente do trocador e não da radiação solar.

Toda seção de testes foi isolada termicamente. A circulação de água no trocador de calor foi ligada e a temperatura de entrada foi fixada em $22,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, mesmo valor da temperatura ambiente do início do teste. As Figuras 61 e 62 mostram as temperaturas e fluxo de calor obtidos nesse teste.

O ajuste do *off-set* foi realizado para os termorresistores, onde foi calculada a temperatura média de todos os sensores, para cada instante de tempo. Em seguida, para cada sensor, obteve-se a diferença entre a temperatura obtida no sensor e a temperatura média.

Foi calculado a média de todas as diferenças obtidas e dessa forma encontrou-se o desvio para cada sensor, aplicado como fator de correção em todos os resultados obtidos. O fator de correção para cada termorresistor pode ser visto na Tabela 23.

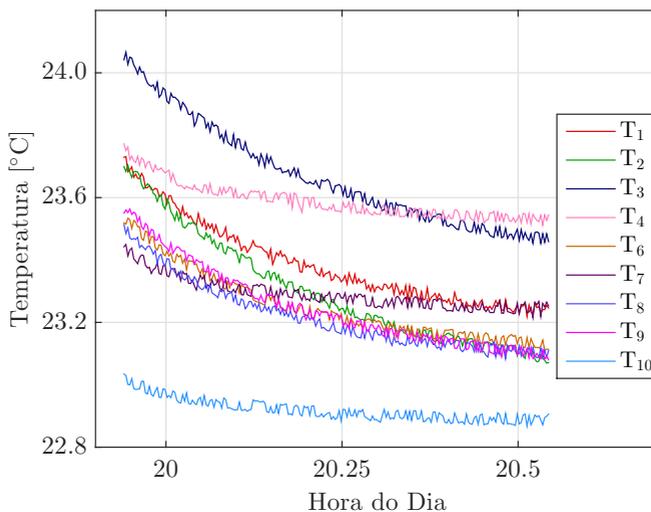


Figura 61 – Temperaturas obtidas no teste noturno

Através da Figura 62 pode-se perceber que não há *off-set* para fluxos de calor próximos de zero, por esse motivo não aplicou-se fato de correção para os transdutores de fluxo de calor.

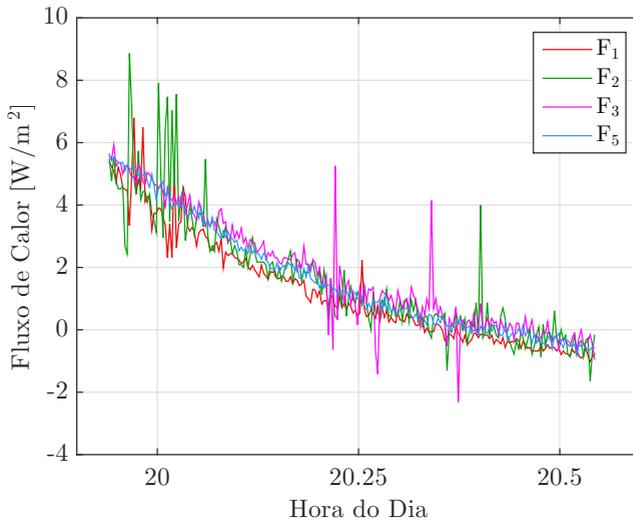


Figura 62 – Fluxos de calor obtidos no teste noturno

Tabela 23 – Correção do *off-set* para os termorresistores

Sensor	Fator de Correção
T ₁	-0,00335
T ₂	-0,12860
T ₃	0,24723
T ₄	0,26258
T ₆	-0,11843
T ₇	-0,02752
T ₈	-0,15145
T ₉	-0,14103
T ₁₀	-0,38922