

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL  
CENTRO TECNOLÓGICO**

Caren Michels

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO  
DE COBERTURAS**

Florianópolis  
2018



Caren Michels

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO  
DE COBERTURAS**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do grau de Doutora em Engenharia Civil.

Orientador: Professor Saulo Güths, PhD

Florianópolis  
2018

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

Michels, Caren

Avaliação Experimental do Desempenho Térmico de Coberturas / Caren Michels; Orientador, Saulo Güths. 2018.

240 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Florianópolis, 2018.

Inclui referências.

1. Engenharia Civil. 2. bancada experimental. 3. coberturas. 4. resistência térmica. 5. fluxo de calor. I. Güths, Saulo. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. III. Título.

Caren Michels

## **AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO DESEMPENHO TÉRMICO DE COBERTURAS**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutora, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

Área de concentração: Construção Civil

Florianópolis, 11 de dezembro de 2018.

---

Prof. Eneid Ghisi, Dr.

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil

### **Banca Examinadora:**

---

Prof. Saulo Güths, Dr.

Orientador

Universidade Federal de Santa  
Catarina

---

Prof. Gilmar Guimarães Dr.

Universidade Federal de  
Uberlândia

---

Prof. Lucila Chebel Labaki, Dr

Universidade estadual de  
Campinas

---

Prof. Roberto Lamberts, Dr.

Universidade Federal de Santa  
Catarina

---

Prof. Deivis Luis Marinoski, Dr.

Universidade Federal de Santa  
Catarina

---

Prof. Martin Ordenes Mizgier,  
Dr.

Universidade Federal de Santa  
Catarina



*Aos meus pais, Ademar e Elga.  
Aos meus irmãos, Cristian e Camila.  
Ao Mateus.*



## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, que sempre incentivaram e priorizaram o estudo e não mediram esforços para que meus sonhos se realizassem.

Aos meus irmãos, pelos momentos de distração, alegria e incentivo.

A realização deste trabalho teria sido mais árdua se não fosse a colaboração de Mateus Rossato, com quem compartilho minha história, que carregou, sem reclamar, lajes, telhas e condicionadores de ar para a cobertura no bloco B da Engenharia Mecânica, e que teve as falanges de dois dedos quebradas ao me auxiliar na construção da bancada experimental.

Ao Professor Saulo Güths, pela orientação, paciência dedicada e amizade.

A UFAM pelo incentivo em minha capacitação profissional.

A FAPEAM (Fundação de Pesquisa do Estado do Amazonas) pelas bolsas de estudo concedidas.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFSC.

Aos filhos do Professor Saulo, Guilherme e Eduardo, pela ajuda na construção da bancada de testes.

Ao Damian, por me auxiliar na programação dos sistemas PID.

Aos bolsistas, Bruno, Gustavo, Fred, Rafael Bogo e Rafael Rank Storm pela ajuda na construção da bancada e na simulação computacional.

A Débora, que durante o final de 2014 e o durante o ano de 2015 trabalhamos juntas na bancada experimental, me auxiliando e incentivando (uma a outra).

Às amigas Helenita e Iara pelo incentivo e pelas conversas.

Aos amigos que fiz no decorrer destes quatro anos, em especial ao pessoal do LMPT.

Aos laboratórios LABSOLAR/LEPTEN pelo fornecimento de dados meteorológicos.

Obrigado a todos que de alguma forma contribuíram para essa pesquisa se tornasse possível.



## RESUMO

Telhados situados em países tropicais são expostos a intensa radiação solar, que afeta a carga necessária para resfriamento em edificações condicionadas e o conforto térmico nas não condicionadas. Reduzir o ganho térmico através da cobertura é uma das maneiras de diminuir o gasto com energia e de proporcionar conforto térmico aos usuários. Desta forma, este trabalho apresenta uma bancada experimental construída em campo que avalia o desempenho térmico simultâneo de oito coberturas em escala reduzida na cidade de Florianópolis (Brasil). Todas as coberturas possuem uma cavidade de ar trapezoidal de iguais dimensões. Nos ensaios de calibração foi investigada se todas as coberturas estavam expostas as mesmas condições de temperaturas, fluxo de calor e resistência térmica para os sentidos de fluxo de calor ascendente e descendente. Além disso, também foram realizadas simulações computacionais e medições em um telhado de dimensões reais para verificar se a bancada experimental fornece resultados compatíveis com os de uma situação real. Os resultados da calibração mostram boa concordância entre os resultados das 8 coberturas, com variação máxima de 8,7% nos valores de resistência térmica. Comparando-se os valores de resistência térmica obtidos entre a bancada experimental e a simulação, houve uma diferença de 21% para o sentido de fluxo ascendente e de 34% para o sentido descendente. Em relação a comparação dos resultados obtidos entre a bancada experimental e as medições no telhado de dimensões reais, encontrou-se uma diferença de 19% para o sentido de fluxo ascendente e de 10% para o sentido de fluxo descendente. Analisou-se o desempenho térmico das coberturas instaladas na bancada experimental para o sentido de fluxo de calor ascendente e descendente ao longo de seis meses de medições e chegou-se a conclusão que a cobertura verde foi a que mais contribuiu para evitar as perdas de calor (no caso do sentido de fluxo ascendente), com uma taxa de redução de 62,3%, e também a que mais evitou os ganhos térmicos (no caso do sentido de fluxo descendente), com proporção de redução no fluxo de calor de 85,2%. A cobertura com poliestireno expandido foi a segunda cobertura com melhor desempenho, evitando as perdas de calor em 57,8% para o sentido de fluxo ascendente e em 68,9% para o sentido de fluxo descendente, resultados similares aos obtidos com a cobertura com barreira radiante, a qual evitou as perdas térmicas em 51% e os ganhos em 66,2%. A cobertura com telhas brancas apresentou bom desempenho para diminuir os ganhos térmicos (reduziu a transferência de calor para o interior em 59,6%), e aumentou as perdas térmicas em 4,3%, assim como

a cobertura com telhas cerâmicas porosas, a qual evitou o ganho térmico de 34,6% e aumentou as perdas térmicas em 2,2%. A cobertura com telhas cerâmicas impermeáveis evitou as perdas térmicas em 11,1% e os ganhos térmicos em 24,7% e cobertura com telhas de fibrocimento e laje de concreto evitou as perdas térmicas em 17,7% e os ganhos em 32,1%. Além desses resultados, avaliou-se a efeito da adsorção ao vapor da água, o efeito da absorção da água proveniente da condensação noturna e o efeito da absorção da água da chuva no desempenho térmico de telhas cerâmicas porosas ao realizar a comparação dos resultados com os obtidos para telhas cerâmicas impermeáveis. Somente com a absorção da água da chuva foi possível observar a redução no ganho térmico em função da evaporação da água, que chegou a 22,5% ao longo de 3 dias. Assim, a bancada experimental se apresentou como uma ferramenta adequada para analisar o desempenho térmico de coberturas em escala reduzida, com resultados que podem ser aplicados a uma situação real.

**Palavras-chave:** bancada experimental, coberturas, resistência térmica, fluxo de calor

## ABSTRACT

Roofs located in tropical countries are exposed to intense solar radiation, which affects the necessary cooling load in conditioned buildings and thermal comfort in non-conditioned ones. Reducing thermal gain by using a cover is one way to decrease energy expenditure and provide thermal comfort to users. Thus, this work presents an experimental workbench in the field that evaluates the simultaneous thermal performance of eight small-scale covers in the city of Florianópolis, Brazil. The experimental workbench consists of an air-conditioned environment over which the roofs were built. All the covers have a trapezoidal air cavity of equal dimensions. In the calibration experiments, we investigated the thermal resistance for both the upflow and downflow direction, the superficial temperatures and the heat flux in the covers. In addition, we carried out computer simulations and measurements on a real scale roof in order to verify if the experimental workbench provides results compatible with the ones in a real situation. The calibration results showed good concordance between the results of the eight covers, with a maximum variation of 8,7% in the thermal resistance values. Comparing the thermal resistance values obtained with the experimental workbench to the ones obtained with the simulation, we observed a difference of 11,8% for the upflow and of 26,1% for the downflow. When comparing the results obtained with the experimental workbench to the real scale roof measurements, we observed a difference of 1,2% for the upflow and of 24,8% for the downflow. We measured and analyzed the thermal performance of the covers installed on the experimental workbench for the upflow and downflow directions throughout six months, from July to December 2017. It was concluded that the green cover was the one which most contributed to preventing heat losses (in the upflow case), with a reduction rate of 62,3%, and it was also the one which avoided the most thermal gains (in the downflow case), with a reduction in heat flux of 85,2%. The cover with expanded polystyrene had the second best performance, preventing heat losses in 57,8% for the upflow and in 68,9% for the downflow. Its results were similar to the ones obtained with a radiant barrier, which prevented thermal losses in 51% and gains in 66,2%. The white roof tiles cover showed good performance in reducing thermal gains (reduced heat transference to the interior in 59,6%), and increased thermal losses in 4,3%, similarly to the porous ceramic tiles cover, which avoided a thermal gain of 34,6% and increased thermal losses in 2,2%. The impermeable ceramic tiles cover prevented thermal losses in 11,1% and thermal gains in 24,7% while the fiber-cement tiles

or the concrete flagstone cover avoided thermal losses in 17,7% and gains in 32,1%. In addition to these results, we also evaluated the effect of adsorption on water steam, the effect of nocturnal condensation water absorption and the rainwater absorption effect on the thermal performance of porous ceramic tiles while we compared these results with the ones obtained with impermeable ceramic tiles. Only through rainwater absorption, it was possible to observe that there was a reduction in thermal gain as a result of water evaporation, which reached 22,5% throughout 3 days. Therefore, the experimental workbench presents itself as a useful tool to analyze the thermal performance of small-scale covers, providing results that can be applied to a real situation.

**Keywords:** experimental test rig, roofs, thermal performance, thermal resistance

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Organograma do desenvolvimento da pesquisa.....	35
Figura 2: Placa quente na parte superior .....	40
Figura 3: Placa quente na parte inferior .....	40
Figura 4: Espaço retangular fechado inclinado .....	41
Figura 5: Cavidade utilizada por LAM et al (1989).....	42
Figura 6: Composição de um telhado verde.....	50
Figura 7: Propriedades radiantes no espectro da radiação solar e do infravermelho longo de materiais de construção.....	53
Figura 8: Planta baixa da bancada experimental .....	69
Figura 9: Imagem da banca experimental .....	70
Figura 10: Esquema dos dutos de saída do ar.....	70
Figura 11: Corte esquemático da bancada experimental.....	71
Figura 12: Isolamento interno das coberturas .....	72
Figura 13: Isolamento externo das coberturas e vedação das telhas .....	72
Figura 14: Detalhe 1- Laje de concreto com as chapas metálicas e o EPS .....	73
Figura 15: Detalhe 1- Forro de PVC rígido com as chapas metálicas e o EPS.....	73
Figura 16: Instalação do sensor para medir a temperatura superficial ..	74
Figura 17: Encapsulamento do termopar para medição da temperatura do ar.....	74
Figura 18: Detalhe do termopar dentro da capsula.....	74
Figura 19: Etapas de execução da junta de referência.....	75
Figura 20: Transdutor de fluxo de calor.....	75
Figura 21: Região central da laje/forro.....	75
Figura 22: Distribuição dos transdutores de fluxo de calor em planta baixa .....	76
Figura 23: Distribuição dos transdutores de fluxo de calor em corte....	76
Figura 25: Planta baixa - posição das coberturas com forro de PVC e das coberturas com lajes de concreto.....	78
Figura 27: Camadas da cobertura jardim.....	80
Figura 28: Modelo esquemático da medição da massa da telha cerâmica .....	81
Figura 29: Sistema para medir a massa das telhas .....	82
Figura 30: Sensor de umidade do tipo resistivo .....	82
Figura 31: Sistema para detectar a umidade.....	82
Figura 32: Instrumentação de telha cerâmica porosa com sensor de umidade .....	83

Figura 33: Influência da posição do transdutor de fluxo de calor na cobertura 1 .....	84
Figura 34: Resistência térmica para fluxo de calor ascendente e descendente.....	87
Figura 35: Comparação entre os métodos de calcular a resistência térmica .....	89
Figura 36: Resistência térmica de acordo com o período de medição ..	91
Figura 37: Temperatura da superfície inferior da laje de concreto .....	92
Figura 38: Temperatura da superfície superior da laje de concreto .....	93
Figura 39: Temperatura do ar no ático.....	94
Figura 40: Temperatura superficial das telhas .....	94
Figura 41: Fluxo de calor na face inferior da laje de concreto.....	95
Figura 42: Fluxo de calor na face superior da laje de concreto.....	96
Figura 43: Temperatura superficial das telhas .....	98
Figura 44: Temperatura do ar no ático.....	99
Figura 45: Temperatura da superfície superior do PVC .....	100
Figura 46: Fluxo de calor na face inferior no forro de PVC .....	100
Figura 47: Resistência térmica para as coberturas .....	101
Figura 48: Temperatura superficial inferior da laje (coberturas 5 e 8)	102
Figura 49: Temperatura superficial das telhas (coberturas 5 e 8).....	103
Figura 50: Fluxo de calor na face superior da laje de concreto.....	103
Figura 51: Resistência térmica para as coberturas 5 e 8 .....	104
Figura 52: Temperatura superficial da telha .....	105
Figura 53: Temperatura da face superior da laje de concreto .....	106
Figura 54: Fluxo de calor para o período de temperaturas altas .....	107
Figura 55: Oxidação da face aluminizada da cobertura 4 .....	107
Figura 56: Resistência térmica – Fluxo descendente .....	109
Figura 57: Temperatura superficial da telha .....	110
Figura 58: Temperatura superficial da laje .....	111
Figura 59: Fluxo de calor nas coberturas.....	112
Figura 60: Resistência térmica – Fluxo de calor ascendente.....	113
Figura 61: Comparação entre a resistência térmica para fluxo ascendente e descendente .....	114
Figura 62: Temperaturas superficiais das telhas .....	116
Figura 63: Temperatura do ar no ático.....	117
Figura 64: Temperatura da superfície inferior do forro .....	118
Figura 65: Fluxo de calor para os dias 15 e 16 de novembro de 2017	119
Figura 66: Temperatura superficial das telhas .....	120
Figura 67: Temperatura do ar no ático.....	121
Figura 68: Temperatura da superfície inferior do forro de PVC.....	122
Figura 69: Fluxo de calor para os dias 21 e 22 de julho de 2017.....	123

Figura 70: Resistência térmica ao longo dos meses – Sentido de fluxo ascendente .....	124
Figura 71: Resistência térmica ao longo dos meses – Sentido de fluxo descendente .....	125
Figura 72: Resistência térmica por cobertura, para sentido de fluxo ascendente e descendente .....	125
Figura 73: Perda de energia nas coberturas ao longo dos meses .....	127
Figura 74: Ganho de energia nas coberturas ao longo dos meses .....	128
Figura 75: Precipitação em Florianópolis/setembro 2017 .....	129
Figura 76: Radiação solar, temperatura do ar externo e umidade relativa de 3 a 5 de setembro 2017 .....	129
Figura 77: Fluxo de calor durante 3, 4 e 5 de setembro de 2017.....	130
Figura 78: Redução na transferência de calor período de 3 a 5 de setembro de 2017 em comparação com o telhado de referência (fibrocimento). 131	
Figura 79: Temperatura de orvalho para os dias 21 e 22 de julho de 2017 .....	132
Figura 80: Condensação sobre a superfície das telhas cerâmicas.....	133
Figura 81: Radiação solar, temperatura do ar externo e umidade relativa de 21 e 22 de julho 2017 .....	133
Figura 82: Fluxo de calor no decorrer dos dias 21 e 22 de julho de 2017 .....	134
Figura 83: Redução na transferência de calor das coberturas com telhas cerâmicas comparadas com a cobertura de referência (fibrocimento) 135	
Figura 84: Radiação solar e temperatura do ar externo para o período de 22 a 26 de agosto de 2017 .....	136
Figura 85: Índice pluviométrica para agosto de 2017 .....	137
Figura 86: Fluxo de calor nas coberturas de referência, com telhas cerâmicas impermeáveis e com telhas cerâmicas porosas.....	138
Figura 87: Redução na transferência de calor das coberturas com telhas cerâmicas comparadas com a cobertura de referência no período de 5 dias. ....	139
Figura 88: Perda de energia para as coberturas de referência, com telhas cerâmicas porosas e com telhas impermeáveis .....	140
Figura 89: Perda de energia para as coberturas de referência, com telhas cerâmicas porosas e com telhas impermeáveis .....	142
Figura 90: Radiação solar e temperatura do ar de 06 a 10 de dezembro de 2017.....	143
Figura 91: Temperaturas nas camadas do telhado verde.....	143
Figura 92: Temperatura superficial das telhas e da camada vegetal ...	145
Figura 93: Temperaturas da superfície inferior do forro .....	146

Figura 94: Fluxo de calor através da cobertura verde e do telhado de fibrocimento .....	147
Figura 95: Temperaturas nas camadas do telhado verde.....	148
Figura 96: Temperatura superficial das telhas e da camada vegetal ...	149
Figura 97: Temperatura da superfície inferior da laje de concreto .....	150
Figura 98: Fluxo de calor na cobertura verde e na cobertura com telhas de fibrocimento .....	151
Figura 99: Energia mensal na cobertura verde e na cobertura com telhas de fibrocimento para sentido de fluxo ascendente .....	152
Figura 100: Energia mensal na cobertura verde e na cobertura com telhas de fibrocimento para sentido de fluxo descendente .....	153
Figura 101: Redução na transferência de calor da cobertura verde em relação a cobertura com telhas de fibrocimento.....	154
Figura 102 Temperatura externa e radiação global para os dias 9 e 10 de dezembro de 2017 .....	155
Figura 103: Temperatura superficial das telhas nos dias 09 e 10 de dezembro de 2017 .....	155
Figura 104: Temperatura da superfície inferior do forro nos dias 09 e 10 de dezembro de 2017 .....	157
Figura 105: Fluxo de calor nas coberturas no decorrer dos dias 09 e 10 de dezembro de 2017 .....	158
Figura 106: Temperatura externa, umidade relativa e radiação global para os dias 21 e 22 de julho de 2017 .....	159
Figura 107: Temperatura superficial das telhas nos dias 21 e 22 de julho de 2017.....	160
Figura 108: Temperatura superficial do forro nos dias 21 e 22 de julho de 2017 .....	161
Figura 109: Fluxo de calor nas coberturas para os dias 21 e 22 de julho de 2017 .....	162
Figura 110: Imagem de mostrando a distância entre a bancada experimental e as edificação em que foram realizadas as medições em escala real.....	167
Figura 111: Vista externa do DMPI.....	168
Figura 112: Vista interna do ático da cobertura.....	169
Figura 113: Localização dos sensores.....	169
Figura 114: Temperaturas superficiais das telhas e do forro (08 a 12 de setembro de 2018).....	170
Figura 115: Fluxo de calor (de 08 a 12 de setembro de 2018).....	170
Figura 116: Resistência térmica por mês para os sentidos de fluxo de calor ascendente e descendente para o ático do telhado de dimensões reais	171

Figura 117: Comparação entre a resistência térmica da bancada experimental e do telhado real.....	172
Figura 118: Geometria da simulação.....	174
Figura 119: Malha aplicada a geometria do telhado .....	175
Figura 120: Modelo teórico utilizado para a verificação da condução	178
Figura 121: Modelo teórico utilizado para a verificação da convecção .....	179
Figura 122: Gráfico mostrando as divergências nos resultados .....	183
Figura 123: Modelo esquemático da verificação da radiação .....	183
Figura 124: Distribuição de temperaturas no telhado para o caso apenas com incidência de radiação .....	185
Figura 125: Padrão de movimento do ar para o verão.....	186
Figura 126: Distribuição de temperaturas no telhado para o caso apenas com convecção externa .....	187
Figura 127: Padrão das células convectivas para o inverno .....	188
Figura 128: Comparação numérica e experimental de R total .....	192
Figura 130: Quadros em EPS (sem e com isolamento).....	196
Figura 131: Modelo por resistências térmicas para fluxo de calor ascendente e sem isolamento térmico .....	197
Figura 132: Modelo por resistências térmicas para fluxo de calor ascendente com isolamento térmico reflexivo .....	198
Figura 133: Analogia por resistência térmica para fluxo de calor descendente sem isolamento térmico .....	201
Figura 134: Analogia por resistência térmica para fluxo de calor descendente e com isolamento reflexivo.....	201
Figura 135: Esquema das resistências térmicas sem isolamento térmico (a) e com isolamento térmico (b) .....	204
Figura 136: Influência da variação da espessura da cavidade de ar na resistência térmica.....	205
Figura 137: Resistência térmica da cavidade de ar e m função da temperatura média.....	205
Figura 138: Resistência térmica em função da diferença de temperatura – fluxo descendente.....	206
Figura 139: Resistência térmica em função da diferença de temperatura – fluxo ascendente.....	207
Figura 140: Manta com emitância térmica de 0,9 nas duas faces – fluxo descendente .....	208
Figura 141: Manta com emitância térmica de 0,05 nas duas faces - fluxo descendente .....	208
Figura 142: Manta com emitância térmica de 0,9 nas duas faces – fluxo ascendente .....	208

Figura 143: Manta com emitância térmica 0,05 nas duas faces – fluxo ascendente.....	208
Figura 144: Baixa emitância térmica da face inferior da manta – fluxo descendente.....	209
Figura 145: Baixa emitância térmica da face superior da manta – fluxo descendente.....	209
Figura 146: Baixa emitância térmica da face inferior da manta – fluxo ascendente.....	209
Figura 147: Baixa emitância térmica da face superior da manta – fluxo ascendente.....	209
Figura 148: Banho MQBMP-01 .....	225
Figura 149: : Temperaturas dos 48 termopares.....	226
Figura 150: Sistema de calibração do transdutor .....	227
Figura 151: Temperatura superficial das telhas .....	233
Figura 152: Temperatura do ar no ático.....	234
Figura 153: Temperatura da superfície inferior do forro .....	234
Figura 154: Temperatura superficial das telhas .....	235
Figura 155: Temperatura do ar no ático.....	235
Figura 156: Temperatura da superfície inferior do forro .....	236
Figura 157: Temperatura superficial das telhas .....	237
Figura 158: Temperatura do ar no ático.....	237
Figura 159: Temperatura da superfície inferior do forro .....	238

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Configuração das coberturas: Estudo 1 .....	77
Quadro 2: Descrição das coberturas: Estudo 2.....	79
Quadro 3: Parâmetros de simulação.....	175
Quadro 4: Resumo da metodologia encontrada em (SLATER, 2008)	177
Quadro 5: Configurações testadas no condutivímetro térmico .....	196



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Ângulos críticos para espaços fechados retangulares inclinados .....	42
Tabela 2: Resistência térmica para diferentes dias de medição.....	90
Tabela 3: Resistência térmica total para por cobertura para fluxo ascendente .....	96
Tabela 4: Resistência térmica por amostra para fluxo descendente .....	97
Tabela 5: Emitância térmica das barreiras radiantes das coberturas 3 e 4 .....	108
Tabela 6: Resistência térmica por dia – verão (fluxo descendente) ....	108
Tabela 7: Resistência térmica por dia para o inverno – fluxo ascendente .....	112
Tabela 8: Temperatura superficial dos isolamentos térmicos .....	117
Tabela 9: Comparação da eficiência energética para as coberturas para o sentido de fluxo de calor ascendente .....	163
Tabela 10: Comparação da eficiência energética para as coberturas para o sentido de fluxo de calor descendente .....	165
Tabela 11: Verificação do modelo condutivo .....	179
Tabela 12: Comparação das expressões de vários autores e a simulação realizada para cavidade retangular .....	181
Tabela 13: Comparação das expressões de vários autores e a simulação realizada para cavidade trapezoidal.....	181
Tabela 14: Verificação do modelo radiativo .....	184
Tabela 15: Comparação dos casos com radiação e verão com temperatura constante.....	186
Tabela 16 - Comparação dos casos com convecção externa e inverno com temperatura constante.....	187
Tabela 17: Resistência térmica em função da escala (sentido de fluxo ascendente).....	190
Tabela 18: Resistência térmica em função da escala (sentido de fluxo descendente).....	191
Tabela 19: Comparação entre as resistências térmicas (bancada experimental, telhado de dimensões reais, simulação computacional e condutímetro térmico e modelo matemático).....	210
Tabela 21: Constantes de calibração dos transdutores de fluxo de calor .....	229
Tabela 22: Refletividade de telhas cerâmicas .....	231
Tabela 23: Refletividade de telhas de fibrocimento .....	231



## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$  = área ( $m^2$ );

ASTM = American Society for Testing and Materials;

CFD = Computer Fluid Mechanics;

DPMI = Departamento de Manutenção Predial e de Infra-estrutura;

$emiss_{placassup}; emiss_{placainf}$  = emitância térmica das face superior e inferior do condutímetro FOX-314;

$g$  = aceleração gravitacional ( $m/s^2$ );

$H/L$  = Razão de aspecto (m);

$h_{conv}$  = coeficiente de troca de calor por convecção ( $W/m^2K$ );

$h_{convsup}; h_{convinf}$  = coeficiente de troca de calor por convecção na cavidade superior/inferior ( $W/m^2K$ );

$h_{rad}$  = coeficiente de troca de calor por radiação ( $W/m^2K$ );

$hr_{sup}; hr_{inf}$  = coeficiente de troca de calor por radiação para a cavidade de ar superior/inferior ( $W/m^2K$ );

ISO = International Organization for Standardization;

$K$  = condutividade térmica ( $W/mK$ );

$L$  = espessura do material (m);

$L$  = espessura (m);

Labsolar = Laboratório de Energia Solar;

$L_c$  = comprimento característico da geometria (m);

$m_v$  = taxa de transmissão de vapor;

$Nu$  = Número de Nusselt;

$Nu_{sup}; Nu_{inf}$  = Número de Nusselt para cavidade de ar superior/inferior;

$P$  = permeabilidade ao vapor do material ( $ng/s m Pa$ , onde  $ng = 10^{-12} kg$  e  $1 Pa = 10^{-5} bar$ );

$Per$  = Permeação ( $kg/s m^2 Pa$ );

PID = Controle proporcional, integral e derivativo;

$P_{sat}$  = pressão saturada;

PVC = poliestireno expandido;

$P_v$  = pressão de vapor;

$q_{cond}$  = Taxa de transferência de calor por condução por unidade de área ( $W/m^2$ );

$q_{conv}$  = fluxo de calor por convecção ( $W/m^2$ );

$q_{convsup}; q_{convinf}$  = taxa de transferência de calor por convecção na cavidade de ar superior/inferior ( $W/m^2$ );

$q_{espsup}; q_{espinf}$  = somatório das taxa de transferência de calor por convecção e radiação por unidade de área ( $W/m^2$ );

$q_{man}$  = taxa de transferência de calor por condução no isolamento reflexivo ( $W/m^2$ );

$q_{\text{rad}}$  = fluxo de calor por radiação ( $\text{W}/\text{m}^2$ );  
 $R$  = resistência térmica ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  
 $Ra$  = número de Rayleigh;  
 $Ra_{\text{sup}}; Ra_{\text{inf}}$  = Número de Raileigh para a cavidade de ar superior/inferior;  
 $R_{\text{convsup}}; R_{\text{convinf}}$  = Resistência térmica para a cavidade de ar superior/inferior ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  
 $Re$  = número de Reynolds;  
 $R_{\text{eq}}$  = resistência térmica equivalente, que é a diferença entre a resistência térmica com isolamento e a sem isolamento ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  
 $R_{\text{espsup}}; R_{\text{espinf}}$  = resistência térmica da cavidade de ar superior/inferior ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  
 $R_{\text{iso}}$  = Resistência térmica calculada pelo método da ISO 9869 ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )  
 $R_{\text{man}}$  = Resistência térmica do isolamento reflexivo ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  
 $R_{\text{medio}}$  = Resistência térmica media ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  
 $R_{\text{radsup}}; R_{\text{radinf}}$  = Resistência térmica por radiação para a cavidade de ar superior/inferior ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  
 $R_{\text{totcom}}$  = resistência térmica total com isolamento térmico ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  
 $R_{\text{totsem}}$  = resistência térmica total sem isolamento térmico ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ );  
 $R_{\text{vapor}}$  = Resistência ao vapor ( $\text{s m}^2 \text{ Pa}/\text{kg}$ );  
 $\text{Sigma}$  = constante de Stephan Boltzmann ( $5.6 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ );  
 $T_1, T_2$  = Temperaturas superficiais (K);  
 $T_{\infty}$  = temperatura do fluido ( $^{\circ}\text{C}$ );  
 $T_{\text{mansup}}; T_{\text{maninf}}$  = Temperatura superficial superior/inferior do isolamento reflexivo (K);  
 $T_s$  = temperatura da superfície ( $^{\circ}\text{C}$ );  
UFSC = Universidade Federal de Santa Catarina;  
 $V$  = velocidade do escoamento livre em uma placa plana (m/s);  
 $V\&V$  = verificação e validação;  
 $\alpha$  = difusividade térmica ( $\text{m}^2/\text{s}$ );  
 $\beta$  = coeficiente de expansão volumétrica (1/K);  
 $\Delta T$  = diferença de temperatura (K);  
 $\varepsilon$  = emitância térmica (adimensional);  
 $\nu$  = viscosidade cinemática do fluido ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

## SUMÁRIO

1.	Introdução .....	31
1.1	Objetivos.....	33
1.1.1	Objetivo Geral.....	33
1.1.2	Objetivos Específicos .....	34
1.1.3	Metodologia.....	34
1.1.4	Estrutura da Tese .....	35
2.	Revisão bibliográfica .....	37
2.1.1	Conceitos fundamentais.....	37
2.1.2	Radiação solar .....	37
2.1.3	Transferência de calor .....	38
2.1.4	Transferência de massa.....	45
2.2	Desempenho térmico de coberturas.....	47
2.2.1	Materiais dos elementos que compõem a cobertura .....	48
2.2.2	Resistência térmica.....	62
2.2.3	Síntese da revisão de literatura .....	67
3.	Bancada experimental.....	69
3.1	construção da Bancada Experimental .....	69
3.1.1	Sensores e Sistema de Medição.....	73
3.1.2	Configurações das coberturas estudadas .....	76
3.1.2.1	Estudo 1: Coberturas com Laje de concreto.....	77
3.1.2.2	Estudo 2: Medições com forro de PVC e laje de concreto	78
3.1.3	Medição da emissividade, absorvância solar e quantificação da umidade absorvida pelas telhas cerâmicas .....	81
3.2	Resultados para a bancada experimental .....	83
3.2.1	Influência da posição do transdutor de fluxo de calor.....	83
3.2.2	Resistência térmica do ático .....	84
3.2.2.1	Influência do sentido do fluxo de calor na resistência térmica	85
3.2.2.2	Cálculo da resistência térmica por meio da média das medições a cada minuto e através do método sugerido pela ISO 9869	87
3.2.2.3	Repetibilidade dos resultados.....	89
3.2.3	Aferição da bancada experimental .....	91
3.2.3.1	Aferição da bancada experimental: Estudo 1 .....	91
3.2.3.2	Aferição da bancada experimental: Estudo 2 .....	97
3.2.4	Análise de coberturas com laje de concreto: Estudo 1: ..	104
3.2.4.1	Resultados para o período de temperaturas altas ...	104

3.2.4.2	Resultados para o período de temperaturas amenas	109
3.2.5	Análise de coberturas com forro de PVC e com laje de concreto: Estudo 2	114
3.2.5.1	Coberturas com forro de PVC e telhas de fibrocimento	115
3.2.5.2	Coberturas com forro de PVC e telhas cerâmicas..	128
3.2.5.3	Telhado verde	142
3.2.5.4	Comparação de todos os sistemas de coberturas da bancada experimental.	154
4.	Medições em um telhado real	167
4.1	instrumentação da cobertura	168
4.2	Resultados das medições no telhado de dimensões reais ...	169
4.2.1	Comparação entre a bancada experimental e o telhado de dimensões reais	171
5.	Simulação Computacional	173
5.1	Metodologia CFD	173
5.1.1.	Criação da geometria	174
5.1.2	Geração da malha	174
5.1.3	Definições físicas	175
5.1.4	Solução	176
5.2	Resultados da Simulação computacional	176
5.2.1	Verificação e Validação (V&V) do modelo CFD	176
5.2.2	Verificação dos modos de transmissão de calor	177
5.2.2.1	Condução	177
5.2.2.2	Convecção	179
5.2.2.3	Radiação	183
5.2.3	Verificação da condição de temperatura constante	184
5.2.4	Análise da influência da escala	188
5.2.4.1	Simulação numérica	189
5.2.5	Comparação numérico experimental	191
6.	Análise complementar em um condutivímetro térmico e comparação entre os resultados.	195
6.1	Modelo Matemático	196
6.2	Cavidade plana Horizontal	196
6.2.1	Sentido do fluxo de calor: ASCENDENTE	197
6.2.1.1	Sem isolamento	197
6.2.1.2	Com isolamento reflexivo	198
6.2.2	Sentido do fluxo de calor: DESCENDENTE	201
6.2.3	Cavidade Inclinada	202
6.2.3.1	Fluxo ascendente	202
6.2.3.2	Fluxo descendente	202

6.2.4	Cavidades Trapezoidais.....	203
6.2.4.1	Fluxo Ascendente.....	203
6.3	Comparação entre os resultados obtidos por meio das medições no condutivímetro e do modelo matemático .....	203
6.3.1	Efeito da variação da espessura da cavidade de ar na resistência térmica equivalente .....	204
6.3.2	Influência da temperatura média na resistência térmica de cavidade retangular horizontal e fechada.....	205
6.3.3	Resistência térmica da cavidade de ar em função da diferença de temperatura e do sentido do fluxo de calor.....	206
6.3.4	Ensaio com barreira radiante .....	207
6.4	Comparações entre medições experimentais na bancada experimental, no telhado de dimensões reais, na simulação, no condutivímetro térmico e o modelo matemático .....	209
7.	Considerações Finais .....	211
7.1	Sugestões para trabalhos futuros .....	214
	REFERÊNCIAS .....	215
	Apêndice 1 .....	225
	Apêndice 2 .....	227
	Apêndice 3 .....	231
	Apêndice 4 .....	233
	Apêndice 5 .....	240



## 1. INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores que mais consome energia, desde a produção e transporte dos materiais, passando pelo processo de construção no canteiro de obras, até a energia utilizada pelas atividades desenvolvidas na edificação e pelos equipamentos de condicionamento térmico. No Brasil, o setor comercial, público e residencial consomem 46,7% do total da energia elétrica produzida (LAMBERTS; DUTRA; PEREIRA, 2014). Neste sentido, torna-se importante incorporar técnicas que visem melhorar as condições de conforto térmico e reduzir o consumo de energia em edificações.

O telhado é a parte mais exposta aos condicionantes climáticos, como radiação solar, chuva, poeira e vento, que podem contribuir para as variações do desempenho térmico de coberturas. Em regiões de clima quente reduzir o ganho térmico pelo telhado implica em reduções na demanda por carga de resfriamento e no aumento nos níveis de conforto térmico. Existem diferentes maneiras de diminuir o ganho térmico através da cobertura e os materiais mais utilizados para esta finalidade são os isolamentos térmicos, as telhas ou pinturas que apresentam alta refletância e sistemas de cobertura vegetal (AL-HOMOUD, 2005; GANGULY; CHOWDHURY; NEOGI, 2016; SOUBDHAN; FEUILLARD; BADE, 2005).

O isolamento térmico é instalado com o objetivo de aumentar a resistência térmica do sistema de cobertura. Dentre os materiais isolantes térmicos existem os que dificultam a transferência do calor por condução e os que dificultam a passagem do calor por radiação (SOUBDHAN; FEUILLARD; BADE, 2005). Os primeiros, chamados isolamentos convencionais, são os materiais que possuem baixa condutividade térmica, como a fibra de vidro, lã de rocha e poliestireno, e o valor da resistência térmica pode ser medida e informada ao consumidor. As pesquisas realizadas com esse tipo de isolamento geralmente avaliam o impacto do isolamento térmico no consumo de energia (AL-SALLAL, 2003)(MATHEWS; KLEINGELD; TAYLOR, 1999) (MEDINA, 2000a).

No segundo grupo estão os que dificultam a passagem do calor por radiação, geralmente produzidos em alumínio aderido a um material que proporcione resistência mecânica e/ou que aumente a resistência térmica total do produto. O isolamento reflexivo é eficaz contra a transferência de calor por radiação porque a superfície aluminizada reflete grande parte da radiação infravermelha e emite pouco do calor que é conduzido através dele (RIMA-I, 2014). Além desse fenômeno não ser linear, ele é impactado pela convecção presente no interior do ático da

edificação, pelo fator de forma do sistema, pelo sentido do fluxo de calor, pela emitância térmica do isolamento reflexivo, pela temperatura média e pela diferença de temperatura (SABER, 2013a). Nesse caso, o valor da resistência térmica não é uma simples medição e dificilmente esse valor vem explícito na embalagem do produto.

Os estudos realizados com isolamentos reflexivos se referem à redução do consumo de energia (ASADI; HASSAN, 2014; ASADI; HASSAN; BEHESHTI, 2012, DESJARLAIS, 2010; GUO et al., 2012; CHANG; CHIANG; LAI, 2008; MEDINA, 2012) e à redução na transferência de calor para o interior da edificação (GUO et al., 2012; WINIARSKI; O'NEAL, 1996; MICHELS; LAMBERTS; GÜTHS, 2008a; MICHELS; LAMBERTS; GÜTHS, 2008b; DIMOUDI; ANDROUTSOPOULOS; LYKOUDIS, 2006; FAIREY, 1994a; MEDINA, 2000b; MEDINA, 2000a; MEDINA; YOUNG, 2008). Outros estudos comparam o desempenho térmico entre o isolamento térmico convencional e o reflexivo (HAUSER et al., 2013; D'ORAZIO et al., 2013).

Nos últimos anos, pesquisas relacionadas aos isolamentos por reflexão da radiação de onda longa investigam a resistência térmica de coberturas com material de baixa emitância térmica (MIRANVILLE et al., 2008; CRAVEN; GARBER-SLAGHT, 2011; BELUSKO; BRUNO; SAMAN, 2011; (SABER, 2012; SABER, 2013a; SABER, 2013b; SABER, 2013c; MIRANVILLE et al., 2012).

Algumas construções situadas em países de clima quente utilizam cores claras como revestimento externo de paredes e coberturas porque “aquecem” menos estas superfícies, e conseqüentemente a transferência de calor para o ambiente interno é menor. Materiais com alta refletância solar, refletem mais a radiação do que a absorvem. O uso de material de alta refletância em coberturas foi tema de pesquisas que avaliaram a relação entre essa característica e o consumo de energia (PARKER; BARKASZI JR, 1997; SHARIAH et al., 1998; PARKER; SONNE; SHERWIN, 1998; SIMPSON; MCPHERSON, 1997), que avaliaram o efeito do tempo, como o acúmulo de poeira e crescimento de fungos nos materiais empregados em coberturas (BERDAHL et al., 2008), assim como a redução na temperatura superficial das telhas e a redução no ganho térmico pelo uso de materiais de alta refletância (PISELLO; ROSSI; COTANA, 2014; PRADO; FERREIRA, 2005; SUEHRCKE; PETERSON; SELBY, 2008; ZINGRE et al., 2015a).

O teto-jardim ou telhado verde é uma estratégia que tem sido utilizada por apresentar muitos aspectos positivos, tanto na escala da edificação quanto na urbana. Esses benefícios na escala da construção se

referem principalmente a redução da temperatura interna e redução das cargas para resfriamento, e, na escala urbana podemos citar a amenização das ilhas de calor, gestão das águas pluviais, redução da poluição, contribuição com a biodiversidade (animal e vegetal). Com o incentivo da melhoria do desempenho térmico e energético das edificações, pesquisas com essa abordagem mostram que telhados verdes são eficazes em reduzir o fluxo de calor para o interior da edificação. PARIZOTTO e LAMBERTS (2011) realizaram um estudo experimental na cidade de Florianópolis em que compararam o desempenho térmico de uma cobertura verde com uma cobertura de telhas cerâmicas e com outra de telhas metálicas durante os períodos quente e frio. O resultado mostrou que, tanto na estação quente quanto a fria, o telhado jardim contribuiu de forma significativa para a redução do ganho térmico.

A maior parte das pesquisas realizadas até o momento avaliou o impacto de estratégias na redução do fluxo de calor que é transferido para o interior das edificações e o reflexo na redução das cargas para resfriamento das edificações. Desta forma, esse trabalho tem como objetivo o desenvolvimento de um método avaliação do desempenho térmico de áticos através de ensaios experimentais, com a construção de uma bancada, através de medições em telhado de escala real e de medições em um condutivímetro térmico, além do desenvolvimento de modelos teóricos através de simulação computacional e do desenvolvimento de um modelo matemático.

O resultado desta pesquisa será útil para engenheiros, arquitetos, construtores e para a população em geral, uma vez que se conhecerá o desempenho térmico de diferentes sistemas de coberturas e poderá ser escolhido o sistema de cobertura que mais se adéqua para cada situação. Além disso, com este trabalho, pretende-se incentivar a redução no consumo de energia e auxiliar profissionais da construção civil a tomarem decisões baseados em informações técnicas.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Desenvolver um método experimental para avaliar o desempenho térmico de coberturas.

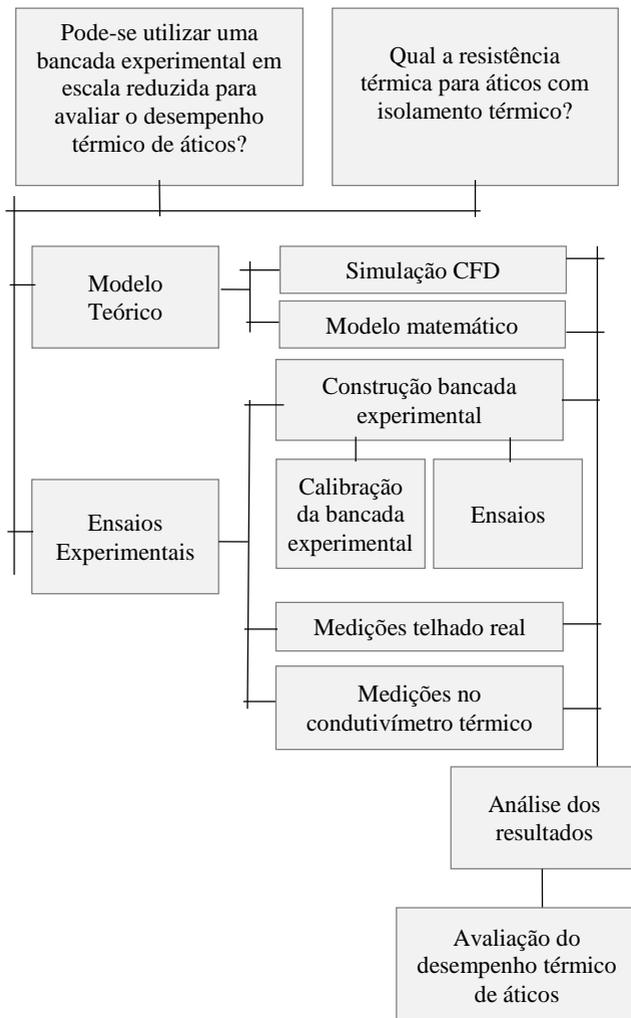
### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Determinar a resistência térmica de cavidades de ar através de simulação computacional e do desenvolvimento de modelo matemático;
- Determinar de forma experimental a resistência térmica do ático em um telhado real e de cavidades de ar em condutivímetro térmico;
- Calcular experimentalmente a resistência térmica do ático de coberturas em bancada de testes em escala reduzida;
- Avaliar o impacto de fatores dimensionais na resistência térmica do ático de coberturas através de modelo matemático e de simulação computacional;
- Contribuir para o que os consumidores, arquitetos e engenheiros possam comparar o desempenho de sistemas de coberturas e escolher o que mais se adéque a sua necessidade;

### 1.1.3 Metodologia

O desenvolvimento desta pesquisa foi realizado através da construção de uma bancada experimental, de medições realizadas em um telhado real, de medições em um condutivímetro térmico, de simulações no programa *CFD* e do desenvolvimento de um modelo teórico, conforme o fluxograma mostrado na Figura 1.

Figura 1: Organograma do desenvolvimento da pesquisa



### 1.1.4 Estrutura da Tese

Este trabalho está dividido em sete capítulos, e cada capítulo refere-se a uma etapa da pesquisa.

O primeiro capítulo aborda a introdução, no qual é contextualizado o tema e mostra os objetivos da pesquisa.

No segundo capítulo é apresentada a revisão de literatura, a qual foi baseada em fontes nacionais e internacionais, abordando assuntos referentes ao tema da tese.

O terceiro capítulo traz informações sobre a bancada experimental e foi organizado em sub-capítulos. Os sub-capítulos abordam desde a construção da bancada, calibração, cálculo da resistência térmica, e os resultados obtidos para os estudos realizados.

O quarto capítulo aborda as medições realizadas no telhado de dimensões reais, desde a instrumentação da cobertura até os resultados obtidos.

A simulação computacional é explorada no capítulo 5, o qual é dividido em sub-capítulos. É mostrado desde o desenvolvimento da simulação e até os resultados obtidos, os quais avaliam a influência da escala da resistência térmica de coberturas, o efeito do sentido do fluxo de calor, da diferença de temperatura, a temperatura média e do uso de material de baixa emitância térmica na resistência térmica de coberturas. No fim deste capítulo, há uma comparação entre os resultados obtidos através da simulação computacional e através das medições experimentais (bancada de teste e telhado de dimensões reais).

No sexto capítulo são realizadas medições em um condutímetro térmico e o desenvolvimento de modelo matemático, cujos resultados são comparados entre si. Ao fim deste capítulo, os resultados de resistência térmica são comparados com os obtidos através da bancada experimental

O capítulo final é a conclusão do trabalho, as limitações e sugestões para pesquisas futuras.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A crise do petróleo ocorrida em meados da década de 70 ficou conhecida pelo embargo do petróleo aos países do ocidente e trouxe como primeira consequência a escassez de energia, tanto para o abastecimento de combustível em veículos quanto para o aquecimento de edificações devido a falta de gás. Além dos impactos imediatos, observados no cotidiano das pessoas, o mais importante foi o surgimento de uma consciência sobre a forma como usamos esse recurso natural e o desenvolvimento de pesquisas sobre a eficiência energética de equipamentos, e posteriormente, sobre o desempenho térmico e energético de edificações.

Em países de clima quente, o aquecimento promovido pelo sol é o principal problema quando se avalia o desempenho térmico de edificações. Em habitações horizontais a maior parte do ganho térmico ocorre pela cobertura e, dependendo dos materiais utilizados, esse ganho térmico pode ser maior ou menor. O desempenho térmico de coberturas depende das características dos elementos que compõem o telhado, como os materiais de todo o sistema de cobertura, da cor da superfície externa, do isolamento térmico e da ventilação existente na camada de ar correspondente ao ático (MEDINA, 2000b).

Abaixo segue uma breve revisão de literatura, a qual foi dividida em conceitos fundamentais, que aborda a radiação solar e a transferência de calor, e em desempenho térmico de coberturas, que fala sobre os parâmetros que afetam a transferência de calor para o interior da edificação.

### **2.1.1 Conceitos fundamentais**

#### **2.1.2 Radiação solar**

A energia do sol que chega a terra é chamada de radiação solar e atinge de forma desigual nosso planeta. Próximo da linha do equador, essa radiação é mais intensa do que próximo dos pólos. A radiação solar é formada por ondas eletromagnéticas e o comprimento de onda vai do infravermelho, passando pela luz visível até a radiação ultravioleta. Todo esse espectro pode ser absorvido por uma superfície e transformado em calor.

De acordo com HINRICHS, KLEINBACH e REIS, (2010) cerca de 19% da radiação que atinge a atmosfera é absorvida pelas nuvens e por outros gases, 31% é refletida de volta para o espaço pelas nuvens e pela

atmosfera e os outros 50% da energia solar incidente chega a terra e são quase completamente absorvidos, sendo somente 3% refletidos. A radiação solar que chega a superfície da terra é dividida entre a radiação solar direta (sem a presença de nuvens) e a radiação solar difusa (que sofre um espalhamento pelas nuvens e pelas partículas da atmosfera, refletida na abóbada celeste e irradiada novamente a terra).

### 2.1.3 Transferência de calor

Transferência de calor pode ser entendida como a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperatura (INCROPERA; DEWITT, 2008). A transmissão de calor pode acontecer de formas diferentes, chamadas de condução, convecção e radiação.

#### a) Condução

É a transferência de calor que ocorre em um mesmo material ou em diferentes materiais desde que eles estejam em contato físico. Ocorre através de colisões moleculares do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura. A taxa de transferência de calor por condução é conhecida como a lei de Fourier, e é proporcional ao gradiente de temperatura.

$$q_{cond} = k \frac{\Delta T}{L} \quad (1)$$

onde,

$q_{cond}$  = Taxa de transferência de calor por condução por unidade de área ( $W/m^2$ );

$k$  = condutividade térmica do material ( $W/mK$ );

$\Delta T$  = diferença de temperatura (K);

$L$  = espessura do material (m).

#### b) Convecção

É a transferência de calor devido ao movimento das moléculas de um fluido. Se o movimento é induzido pelo gradiente de temperatura do fluido é dito convecção natural. Caso o movimento seja induzido por um agente externo é dito convecção forçada. A taxa de transferência de calor é dada pela Lei de Resfriamento de Newton.

$$q_{conv} = h(T_{sup} - T_{\infty}) \quad (2)$$

onde:

$q_{conv}$  = fluxo de calor por convecção (W/m<sup>2</sup>);

$h$  = coeficiente de troca de calor por convecção (W/m<sup>2</sup> K);

$T_{sup}$  e  $T_{\infty}$  = temperaturas da superfície e do fluido (K);

### - Convecção Natural em espaços Fechados

Muitos pesquisadores estudaram o fenômeno de convecção natural em cavidades fechadas. O estudo desse fenômeno é de extrema importância hoje em dia, pois está presente em várias áreas, como painéis e destiladores solares, fornos, eletrônicos e, relacionando com o tema desta pesquisa, em áticos de edificações residenciais.

A bibliografia disponível para a convecção natural em cavidades fechadas retangulares é bastante extensa. CORCIONE (2003), HOLLANDS, RAITHY e KONICEK (1975) LEONG, HOLLANDS e BRUNGER (1998), NICOLETTE, YANG e LLOYD (1985) e OSTRACH (1972), entre outros, estudaram a cavidade retangular sobre diferentes aspectos e contribuíram muito para a compreensão desse fenômeno.

Espaços fechados são encontrados com certa frequência em edificações, como, por exemplo, janelas de vidro duplo e em ático. Correntes convectivas podem ser geradas e são dependentes do formato da cavidade e do sentido do fluxo de calor. As correlações empíricas são normalmente apresentadas em função do número de Nusselt (Nu), número adimensional que representa a razão entre a transferência de calor por condução e por convecção:

$$Nu = \frac{hL}{k} \quad (3)$$

As correlações de convecção natural são ainda apresentadas em função do número de Rayleigh que é o produto dos números de Grashof (razão entre forças de flutuação e forças viscosas) e Prandtl (razão entre difusividade de momento e difusividade térmica) (BEJAN, 2004).

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_{\infty})L^3}{\alpha\nu} \quad (4)$$

onde:

$Nu$  = número de Nusselt;

$h$  = coeficiente de troca de calor por convecção ( $W/m^2K$ );

$L$  = espessura da camada de ar no sentido do fluxo de calor (m);

$k$  = condutividade térmica ( $W/mK$ );

$g$  = aceleração gravitacional ( $m/s^2$ );

$\beta$  = coeficiente de expansão volumétrica ( $1/K$ );

$T_s$  = temperatura da superfície ( $^{\circ}C$ );

$T_{\infty}$  = temperatura do fluido ( $^{\circ}C$ );

$\nu$  = viscosidade cinemática do fluido ( $m^2/s$ )

$\alpha$  = difusividade térmica ( $m^2/s$ )

### - Espaço fechado retangular horizontal

Em um espaço fechado horizontal, as características da transferência de calor dependem do sentido do fluxo de calor. Quando a placa quente está na parte superior e a fria na inferior, as correntes de convecção não se desenvolverão e o ar tende a ficar estagnado (Figura 2). Nesse caso, pode-se dizer que a transferência de calor será por condução pura e o número de Nusselt será igual a 1. Quando a placa mais quente está na parte inferior, o fluido mais denso estará em cima e o mais leve na parte de baixo, existindo assim uma tendência de o ar mais leve subir e o mais frio descer, criando correntes de convecção (Figura 3). Para espaços de ar horizontais e fechados com fluxo de calor ascendente, a correlação empírica mais usual é a apresentada pela Equação 5.

$$Nu = 0,069Ra_L^{\frac{1}{3}} Pr^{0,074}, \quad (5)$$

Para  $3 \times 10^5 < Ra_L < 7 \times 10^9$

Figura 2: Placa quente na parte superior

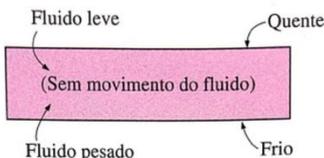
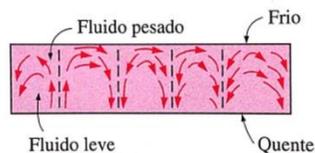


Figura 3: Placa quente na parte inferior

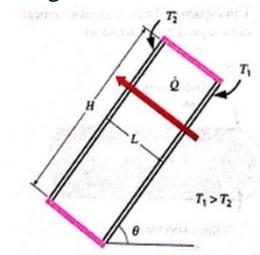


Fonte: Çengel, Yunus A (2009)

## - Espaço fechado retangular inclinado

Este tipo de configuração pode ser encontrado em painéis de aquecimento de água e em telhados inclinados. A transferência de calor através deste espaço depende da razão de aspecto  $H/L$ , bem como da inclinação  $\theta$  a partir do ângulo horizontal (Figura 4).

Figura 4: Espaço retangular fechado inclinado



Fonte: Çengel, Yunus A (2009)

Para grandes razões de aspecto ( $H/L \geq 12$ ) e  $Ra_L < 10^5$  a equação abaixo correlaciona os dados experimentais muito bem para ângulos de inclinação de até  $70^\circ$ . A notação  $[ ]^+$  implica que se a grandeza entre os colchetes for negativa, seu valor deve ser igualado a zero.

$$Nu_L = 1 + 1,44 \left[ 1 - \frac{1708}{Ra_L \cos \theta} \right]^+ \left( 1 - \frac{1708 (\sin 1,8\theta)^{1,6}}{Ra_L \cos \theta} \right) + \left[ \frac{(Ra_L \cos \theta)^{\frac{1}{3}}}{18} - 1 \right]^+ \quad (6)$$

Para razões de aspecto menores ( $H/L < 12$ ) a relação abaixo pode ser utilizada desde que o ângulo de inclinação seja menor do que o crítico apresentado na Tabela 1.

$$Nu = Nu_{\theta=0^\circ} \left( \frac{Nu_{\theta=90^\circ}}{Nu_{\theta=0^\circ}} \right)^{\frac{\theta}{\theta_{cr}}} (\sin \theta_{cr})^{\frac{\theta}{(4\theta_{cr})}} \quad 0^\circ < \theta < \theta_{cr} \quad (7)$$

Tabela 1: Ângulos críticos para espaços fechados retangulares inclinados

Razão de aspecto (H/L)	Ângulo crítico
1	25°
3	53°
6	60°
12	67°
>12	70°

Fonte: (ÇENGEL, 2009)

Para ângulos maiores do que o crítico ( $\theta_{cr} < \theta < 90^\circ$ ), o número de Nusselt pode ser obtido pela equação abaixo:

$$Nu = Nu_{\theta=90^\circ}(\text{sen}\theta)^{1/4} \quad \theta_{cr} < \theta < 90^\circ, \text{ qualquer } H/L \quad (8)$$

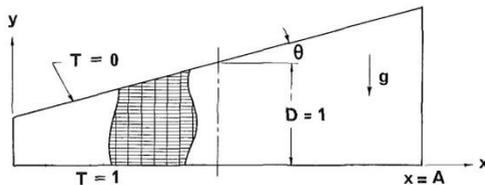
Para espaços fechados inclinados com mais de  $90^\circ$ , a razão recomendada é

$$Nu = 1 + (Nu_{\theta=90^\circ} - 1)\text{sen}\theta \quad 90^\circ < \theta < 180^\circ \quad (9)$$

### - Transferência de calor em cavidades trapezoidais com fluxo de calor ascendente

Apesar de existir menor quantidade de trabalhos com esse tipo de cavidade, há alguns autores que estudaram esse fenômeno. LAM et al. (1989) estudaram numericamente e experimentalmente uma cavidade trapezoidal com inclinação à direita, cujas condições são mostradas na Figura 5.

Figura 5: Cavidade utilizada por LAM et al (1989)



Nesse artigo foi estudada a influência do número de Rayleigh (calculado baseando-se na altura média) e do ângulo de inclinação entre

a horizontal e a superfície superior da cavidade trapezoidal no número de Nusselt médio na cavidade. O experimento foi realizado com as paredes internas da cavidade cobertas com um filme de poliéster aluminizado (com uma emitância térmica de aproximadamente 0,02) para minimizar a transmissão de calor por radiação. Adicionalmente, a variação no número de Rayleigh se deu apenas pela variação da pressão no interior da cavidade, sem nenhuma mudança nas temperaturas das paredes, o que garante que a radiação não terá praticamente nenhuma influência nos resultados.

Os resultados mostraram uma diminuição do número de Nusselt e um aumento com um número de Rayleigh conforme o aumento do ângulo de inclinação. Esta oposição entre as duas variáveis indica uma relação complexa entre o fluxo total de calor, o número de Rayleigh e o ângulo de inclinação. A expressão que melhor traduz essa relação complexa é:

$$\overline{Nu}_H = 0.168 \left[ Ra_H \left( \frac{1 + \cos \theta}{2} \right) \right]^{0.278} \left[ \frac{1 - \cos \theta_{max}}{\cos \theta - \cos \theta_{max}} \right]^{-0.199} \quad (10)$$

HAMMAMI et al (2007) estudaram a transferência de calor em uma cavidade trapezoidal semelhante à utilizada em LAM et al. (1989). O estudo foi feito com uma mistura binária de ar e água ( $Pr = 0,7$ ), em três dimensões e através de métodos numéricos. Nesse artigo foi feito um estudo paramétrico onde foi avaliada a influência de quatro parâmetros: razão de aspecto longitudinal (razão entre o comprimento e a altura média do trapézio), razão de aspecto transversal (razão entre a profundidade da cavidade e a altura média do trapézio), inclinação da superfície superior e o número de Rayleigh.

O estudo da variação da razão de aspecto longitudinal demonstrou que para valores pequenos (entre 1 e 2), os padrões de convecção foram basicamente mono-celulares (apresentavam apenas uma célula convectiva no centro da cavidade) enquanto que para valores maiores (entre 2 e 4) esses padrões eram multi-celulares (apresentando mais de uma célula convectiva). Para o último caso, as células convectivas adicionais que apareciam se movimentavam mais para o lado menor da cavidade, com velocidades menores, o que causa uma zona de estagnação no lado menor da cavidade. O aparecimento de mais células convectivas estimula a transmissão de calor e a homogeneização do fluido. A variação da razão de aspecto transversal demonstrou que

conforme esse valor cresce há uma variação grande na velocidade na direção z da cavidade, porém não há uma grande influência no número de Nusselt médio na cavidade.

### - Escoamento Laminar e Turbulento

O escoamento de um fluido pode ser ordenado ou caótico. Diz-se laminar quando as partículas do fluido têm o aspecto de camadas de lâminas. Normalmente ocorre com fluidos de alta viscosidade, em baixas velocidades. Já o escoamento turbulento é caracterizado pelo movimento desordenado dos fluidos e por flutuações na velocidade do mesmo. A transição entre o escoamento laminar e o turbulento ocorre ao longo de uma região que oscila entre os dois escoamentos, antes de ser considerado turbulento.

A camada limite turbulenta é formada por quatro partes, em função da distância da parede. A subcamada viscosa é a mais próxima da parede, pouco espessa e onde os efeitos viscosos são dominantes, a velocidade do ar é praticamente linear e o escoamento é alinhado. Na sequência, há a camada amortecedora, onde os efeitos turbulentos começam a se tornar significativos, o escoamento ainda é dominado pelos efeitos viscosos. Após essa camada, está a camada de sobreposição, na qual os efeitos turbulentos são mais significativos, mas não dominantes. Por fim, está a camada turbulenta, onde os efeitos turbulentos dominam sobre os viscosos.

Devido ao desordenamento do fluido, ocorre uma intensa mistura do fluido em escoamentos turbulentos e isso aumenta a transferência de calor e de quantidade de movimento entre as partículas do fluido, o que aumenta a transferência do calor por convecção e a força de atrito entre a superfície.

Osborn Reynolds descobriu que o regime de escoamento depende da razão das forças de inércia para as forças viscosas do fluido. Esta razão é chamada de número de Reynolds (adimensional), conforme a Equação 11.

$$Re = \frac{\text{forças de inércia}}{\text{forças viscosas}} = \frac{VL_c}{\nu} \quad (11)$$

onde,

$V$  = velocidade do escoamento livre em uma placa plana (m/s);

$L_c$  = comprimento característico da geometria (m);

$\nu$  = viscosidade cinemática do fluido ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

### c) Radiação

A transferência de calor por radiação não necessita de um meio para propagar-se. A radiação é emitida por um material na forma de ondas eletromagnéticas. A Equação 12 é a utilizada para calcular a taxa de transferência de calor por radiação.

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma(T_s^4 - T_o^4) \quad (12)$$

onde:

$q_{rad}$  = fluxo de calor por radiação ( $\text{W}/\text{m}^2$ );

$\varepsilon$  = emitância térmica (admissional);

Sigma = constante de Stephan Boltzmann ( $5.6 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ );

$T_s$  e  $T_o$  = temperaturas superficiais (K)

## 2.1.4 Transferência de massa

Entende-se por transferência de massa o transporte de um componente de um local de alta concentração para um de menor concentração. O sentido do fluxo de transição é sempre na direção de reduzir a concentração. Os mecanismos de transferência de calor e de massa são análogos e pode-se entender a transferência de massa traçando paralelos entre esses mecanismos.

A diferença de temperatura rege a transferência de calor. Comparando com a transferência de massa, o princípio que rege esse mecanismo é a diferença de concentração. A temperatura seria a concentração de calor, e um local de alta temperatura seria o local de maior concentração do calor (ÇENGEL, 2009).

A transferência do calor pode ocorrer por condução, convecção e radiação, já a massa é transferida por condução e convecção. Se a transferência de calor por condução é expressa pela lei de Fourier, a transferência de massa é expressa pela lei de Fick.

A convecção de massa ocorre de forma similar que a convecção do calor. O movimento do fluido aumenta a transferência de calor através da remoção do fluido aquecido próximo da superfície e da substituição do fluido mais frio longe dela. Em relação a convecção de massa, a transferência de massa entre uma superfície e um fluido em movimento é o mecanismo que envolve a difusão de massa e o movimento da massa de fluido.

– Migração de vapor de água em edificações

A transferência de umidade é um assunto de extrema importância para a construção e manutenção de edificações uma vez que a presença da umidade influencia o desempenho e durabilidade dos materiais. A presença da umidade em um material pode fazê-lo aumentar a dimensão e quando essa umidade evapora, o material reduz a dimensão. Essa mudança cíclica pode colocar em risco a integridade estrutural dos componentes de uma edificação. Assim como o excesso de umidade provoca mudanças na aparência dos materiais, como a corrosão e apodrecimento.

A umidade também afeta a condutividade térmica efetiva de materiais porosos, como por exemplo, os materiais isolantes. De acordo com ÇENGEL (2009) alguns estudos indicam que a transferência de calor por condução aumenta com o teor de umidade. Um isolamento que contenha 5% de umidade em volume aumenta a transferência de calor entre 15 e 25% quando comparado com o isolamento seco. A migração da umidade pode servir também como um mecanismo de transferência para o calor latente alternando a evaporação e a condensação.

A migração da umidade em paredes, pavimentos ou tetos de edificações pode ser controlada pelas barreiras de vapor ou pelos retardadores de calor. O último é o mais indicado pelo fato de não impedir a migração da umidade, ou seja, os materiais utilizados como retardadores de umidade dificultam a absorção da umidade e permitem que a umidade que foi absorvida possa ser eliminada ao longo do tempo.

Pode-se dizer que o ar atmosférico é uma mistura de ar seco e vapor d'água e a pressão atmosférica é a soma da pressão do ar seco e da pressão do vapor d'água, chamada de pressão de vapor ( $P_v$ ). A razão entre a quantidade real de umidade presente no ar a dada temperatura e a quantidade máxima de água que o ar pode conter é chamada de umidade relativa (UR), que varia de 0 a 100% (ar saturado).

A vazão mássica de umidade através de uma camada plana de espessura  $L$  e área normal  $A$  pode ser expressa pela Equação 13.

$$m_v = P * A \frac{P_{v,1} - P_{v,2}}{L} = PA \frac{UR_1 * P_{sat,1} - UR_2 * P_{sat,2}}{L} \quad (13)$$

onde:

$m_v$  = taxa de transmissão de vapor;

$P$  = permeabilidade ao vapor do material (ng/s m Pa, onde ng =  $10^{-12}$  kg e 1 Pa =  $10^{-5}$  bar);

$A$  = área ( $m^2$ );  
 $P_v$  = pressão de vapor;  
 $P_{sat}$  = pressão saturada;  
 $L$  = espessura (m).

A permeabilidade dos materiais de construção é expressa para uma espessura, chamado de permeação (Per), mostrada na Equação 14.

$$Per = \frac{P}{L} \quad (14)$$

onde,

Per = Permeação ( $kg/s \ m^2 \ Pa$ )

O inverso da permeação é chamada de resistência de vapor, mostrada na Equação 15.

$$R_{vapor} = \frac{1}{Per} = \frac{L}{P} \quad (15)$$

onde,

$R_{vapor}$  = Resistência ao vapor ( $s \ m^2 \ Pa/kg$ )

A resistência ao vapor representa a dificuldade que o material impõe em transferir vapor de água. E a resistência global da estrutura de um edifício em transferir umidade é o somatório das resistências. Desta forma, a taxa de transmissão de vapor através de uma estrutura composta pode ser calculada de forma similar à transferência de calor Equação 16.

$$m_v = A \frac{\Delta P_v}{R_{v \ total}} \quad (16)$$

## 2.2 DESEMPENHO TÉRMICO DE COBERTURAS

Uma das grandes preocupações evidenciadas nos últimos anos relaciona-se a quantidade de energia consumida para proporcionar conforto térmico em edificações. Até alguns anos atrás, a maior parte dos arquitetos e engenheiros não se preocupavam em escolher materiais e sistemas que proporcionassem conforto térmico de forma passiva e assim,

reduzir o consumo da energia usada em sistemas mecânicos de condicionamento térmico.

Uma parcela significativa dessa energia empregada para resfriar os ambientes decorre em consequência da transferência de calor pela cobertura das edificações. A radiação solar, ao incidir sobre a superfície das telhas, é absorvida pelas mesmas e as aquece. Uma parcela deste calor é perdida por convecção e irradiação ao ambiente externo e a outra parcela é absorvida e transmitida ao ático. A parcela absorvida transmite o calor de duas formas: radiação e convecção. Por sua vez, a radiação incidente na superfície da laje (ou forro) é absorvida, transferindo o calor para os ambientes internos da edificação.

A quantidade de energia transferida através da cobertura para os ambientes internos da edificação depende de vários fatores, como o material dos elementos que compõem a cobertura (teto jardim, material da telha e do forro/laje), a cor do revestimento externo, a presença de material de isolamento térmico, da ventilação no ático além de processos de migração de umidade e mudança de fase.

Em regiões do Brasil de clima quente, onde se deseja obter um resfriamento noturno, o ideal é não isolar a edificação e utilizar materiais leves, de baixa inércia térmica para que as trocas térmicas ocorram com mais facilidade, conforme concluiu LOUREIRO (2003) para edificações em Manaus. Já PASSOS (2016) constatou, ao realizar simulações computacionais, que para a zona bioclimática 8 (a qual Manaus faz parte) o ideal é isolar termicamente a cobertura, pois proporciona redução no consumo de energia, além de proporcionar maior porcentual de horas de conforto térmico.

### **2.2.1 Materiais dos elementos que compõem a cobertura**

A cobertura de uma edificação pode ter diversas configurações, e cada configuração apresentará um desempenho térmico diferente. É importante conhecer as propriedades térmicas dos elementos/materiais que compõem o sistema de cobertura para que se possa projetar e construir edificações com melhor desempenho térmico, proporcionando conforto térmico aos usuários e menor gasto em energia.

No Brasil é comum o emprego das telhas de fibrocimento e de material cerâmico (natural ou esmaltada). As primeiras geralmente são utilizadas em edificações de baixa renda, por possuírem custo menor em relação às telhas de barro. Entre diferenças de resistência térmica e absorvidade solar, as telhas cerâmicas apresentam uma capacidade de absorção de água superior às telhas fibrocimento. Em noites frias de céu

limpo, as telhas perdem energia por radiação para o céu deixando a temperatura superficial da telha menor que a do ar. Dependendo das condições climáticas, pode ocorrer condensação da água na superfície da telha, e consequentemente a telha absorverá essa água. Durante a manhã, a radiação solar aquecerá a telha e aumentará a sua temperatura, fazendo a telha perder essa umidade. Assim, parte desta energia é gasta no processo de evaporação e a temperatura superficial das telhas é menor do que se não houvesse a presença da umidade (BUENO, 1994; BUENO A. D, PHILIPPI P.C, LAMBERTS RO, 1996). Esse processo pode ocorrer mesmo sem condensação noturna. Durante a noite a umidade relativa é mais alta, e a telha, sendo um meio poroso, tenderá a entrar em equilíbrio nessa nova condição, absorvendo vapor d'água do ar ambiente. Em seu trabalho LAMBERTS (1988) verificou que mais de 20% da energia solar incidente pode ser gasta no processo de evaporação da água das telhas e durante o verão e o efeito da absorção da água da chuva é similar ao da condensação.

Os materiais que compõem a cobertura são expostos a ambiente externo, como o vento, radiação solar, umidade, chuva, granizo, neve, poluição atmosférica e variações da temperatura, os quais contribuem para a degradação ao longo do tempo. BERDAHL et al. (2008) publicou um artigo de revisão no qual mostra o efeito destes parâmetros no envelhecimento das telhas. Nesse trabalho foi dada ênfase para as mudanças químicas e visíveis relacionadas a refletância solar. O efeito da fotodegradação nos materiais orgânicos, plásticos, madeira, asfalto e pigmentos é muito importante, uma vez que esse processo se inicia pela radiação ultravioleta e envolve reações químicas com o oxigênio e vapor de água, ocasionado fragilidade mecânica. As temperaturas mais altas, obtidas pela absorção da energia em materiais escuros podem levar a aceleração da degradação através de reações químicas. A presença da umidade pode acelerar os processos de corrosão em metais, auxiliar no processo de incrustar poeira e fuligem, além do crescimento de algas, fungos e musgos. Esses fatores podem aumentar a absortância solar, e consequentemente a energia absorvida pela cobertura.

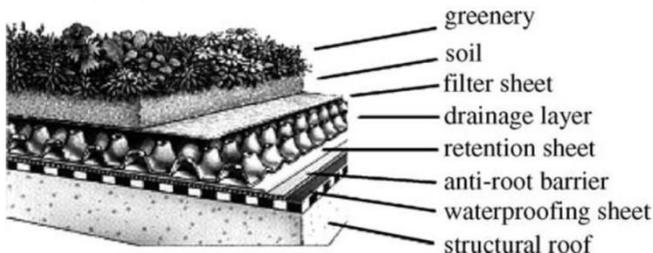
#### ✓ Telhado verde

O uso de vegetação como cobertura é uma solução construtiva adotada desde milênios atrás, que pode ser observada na arquitetura vernacular de povos que habitavam a terra. O registro mais antigo encontrado foi o templo do Zigurate de Nanna, em Ur, na Mesopotâmia (atualmente Mugaiyir, Iraque) (LAMBERTS et al., 2010).

Com a atual preocupação sobre a questão ambiental, os telhados verdes trazem muitos benefícios como a gestão/reaproveitamento de águas pluviais, reduzirem o efeito das ilhas de calor presentes em centros urbanos, pode reduzir a poluição do ar, podem aumentar a biodiversidade animal e vegetal, além de diminuir o consumo de energia para resfriamento por transferir uma quantidade menor de calor ao ambiente interno do que um telhado convencional.

Os telhados verdes são sistemas de cobertura em que ao invés da presença das telhas, há a presença de uma camada vegetal, além das camadas de impermeabilização, de drenagem e de substrato, conforme mostrado na Figura 6. A vegetação escolhida para uso no telhado verde deve resistir ao clima da região onde está inserido, pois estará exposto à radiação solar, ao regime de chuvas e aos ventos predominantes. A vegetação mais utilizada são as rasteiras e as suculentas. Essas últimas resistem mais aos períodos de seca, porém perdem menos água no processo da evapotranspiração.

Figura 6: Composição de um telhado verde



Fonte: LAZZARIN, CASTELLOTTI e BUSATO (2005)

No que se refere ao desempenho térmico e redução do consumo de energia pelo uso de telhados verdes muitas pesquisas já foram desenvolvidas. No estudo realizado por JAFFAL, OULDBOUKHITINE e BELARBI, (2012) avaliou-se o impacto do telhado verde no consumo de energia, na França. Foram avaliadas as temperaturas da folhagem, do solo, da laje do telhado e do ar interno, bem como o fluxo de calor através do telhado, a demanda de resfriamento e a demanda de aquecimento.

Os resultados mostraram que a presença do telhado verde protege a laje de temperaturas extremas e de grandes flutuações na temperatura. Isso ocorre pelo fato da vegetação proporcionar sombreamento, pela evapotranspiração e pela resistência térmica. O efeito do resfriamento passivo foi observado no verão e as perdas diárias de calor aumentaram em quase

aproximadamente 3 vezes com o uso de telhado verde, fato que colabora o uso de telhados verdes como uma solução eficaz para o conforto térmico e redução nas cargas para resfriamento. O impacto do telhado verde na temperatura do ar interno e na demanda de cargas para resfriamento e aquecimento foi analisado. O telhado verde diminuiu a temperatura interna em 2°C e a demanda anual de energia foi reduzida em 6%. Além disso, esse estudo mostrou que o desempenho térmico de telhados verdes não é proporcional ao índice de área foliar e associa o desempenho térmico ao isolamento térmico da cobertura.

A pesquisa realizada por COMA et al. (2016) consiste na avaliação experimental do consumo de energia e do comportamento térmico de três amostras (cubículos). O estudo foi realizado em Lleida, Espanha. No caso de referência, o telhado é plano com 3 cm de isolamento térmico, e nas outras duas amostras o isolamento foi substituído por 4 cm de borracha de pneu reciclada e por 4 cm de pozzolana, ambas usadas como material de drenagem. Essas duas últimas amostras apresentam 5 cm de substrato e camada vegetal. Os resultados mostraram que as amostras com pozzolana e com borracha de pneu reciclada reduziram o consumo de energia em 16,7% e 2,2%, respectivamente, em relação à amostra de referência para períodos quentes. Durante o período frio, em que o aquecimento é necessário, as amostras aumentaram o consumo de energia em 6,1% e 11,1%, respectivamente, comparados com a amostra de referência.

BEVILACQUA et al. (2015) realizou um estudo para a mesma cidade da pesquisa citada acima, cujo clima é classificado como mediterrâneo continental seco. A primeira análise foi sobre o cobrimento vegetal no solo e sobre as características da composição das folhas. Depois, realizaram-se análises durante o verão e o inverno, em termos de fatores espaciais e temporais, com foco na camada do substrato, no efeito da evapotranspiração e realizou-se uma comparação do comportamento de sistemas de baixo e alto cobrimento vegetal. Como resultado do primeiro estudo, observou-se mudanças temporais e espaciais na vegetação, sendo o pico máximo de crescimento atingindo entre a primavera e o verão. O aumento do cobrimento vegetal teve pouco impacto no ambiente próximo do telhado. Os autores atribuem este fato a baixa umidade do solo, mostrando que o impacto do resfriamento evaporativo não foi evidente. Além disso, o aumento do sombreamento proporcionado pela vegetação pode induzir a limitação no resfriamento do substrato enquanto que durante o dia funciona como uma boa barreira contra a radiação solar.

A água presente dentro do solo pode mudar de fase durante o inverno. Durante essa mudança de fase, o solo pode armazenar muita energia que poderá influenciar o desempenho térmico de telhados verdes. TANG e QU (2016) realizaram um estudo onde desenvolveram um modelo simplificado para analisar o desempenho de telhados verdes em climas frios. Os resultados mostraram que telhados verdes podem reduzir as flutuações da temperatura do telhado, além de reduzirem as perdas de calor durante o inverno em 17,9%, quando comparado com um telhado convencional.

LIZ (2016) avaliou o desempenho térmico de diferentes configurações de telhado verde. Nos ensaios variou o teor de umidade, a espessura do substrato, tipo da cobertura vegetal e a presença de isolamento térmico entre a laje e a camada impermeabilizante em uma das amostras. Em um primeiro ensaio foi avaliado o efeito da espessura da camada de substrato (5 cm e 15 cm) e da presença de umidade no substrato. Ao aumentar a espessura de 5 cm para 15 cm, houve a redução de 55% no fluxo de calor máximo e, em relação a umidade no substrato, o fluxo de calor máximo diminuiu 16% quando comparado ao substrato seco.

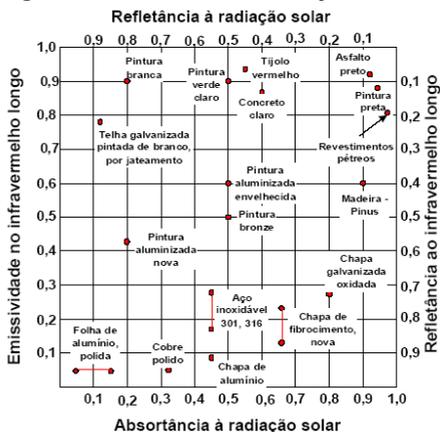
Quando se inseriu a cobertura vegetal em uma das amostras houve redução de 58% no fluxo de calor máximo e quando se comparou com a amostra de telhas de fibrocimento esta redução foi de 84%. Em outro ensaio realizado, as duas amostras apresentaram cobertura vegetal, porém de diferentes tipos, e a redução no fluxo de calor foi de 52%, que pode ser atribuído as características físicas e metabólicas das plantas, uma vez que cada tipo de vegetação proporcionou diferentes sombreamentos do substrato e de evapotranspiração. Por último, foi instalado isolamento térmico em uma das amostras. Nesse período, os dias eram mais frios e o sentido do fluxo de calor era ascendente. Comparando estas amostras, a que recebeu a camada isolante reduziu as perdas de calor em 62%.

✓ Absortância/Refletância da superfície externa das telhas

A resposta dos materiais quando expostos a radiação de onda longa pode ser diferente da resposta quando expostos a radiação solar (com grande parcela de radiação de onda curta). Uma grande parcela da radiação solar está na faixa de luz visível e os materiais são caracterizados pela cor. Por exemplo, uma pintura branca reflete mais radiação solar do que uma pintura preta, porém, quando expostas a radiação de onda longa, as duas pinturas, apresentam um comportamento parecido. A Figura 7

compara as características da radiação solar e da radiação infravermelha de onda longa para os materiais de construção mais comuns.

Figura 7: Propriedades radiantes no espectro da radiação solar e do infravermelho longo de materiais de construção



Fonte: VITTORINO; SATO; AKUTSU, 2003

ALGARNI e NUTTER (2015) realizaram um estudo para estimar o impacto do acúmulo de poeira na absortância da superfície de telhas e o ganho total de calor. Para tanto, desenvolveram um modelo matemático para calcular a absortância solar em função da taxa de acúmulo de poeira. O depósito de poeira foi estimado utilizando o *Non-hydrostatic Multi-scale Model (NMMB)* para 16 países do oriente médio e norte da África, com médias mensais de acúmulo de poeira. Os resultados mostraram que a poeira aumentou a absortância do telhado do valor inicial até a absortância da poeira baseado nas condições climáticas e nas características do telhado. Em todos os locais estudados a média mensal calculada de poeira acumulada variou entre 1,3 e 73,8 g/m<sup>2</sup>/mês. O modelo resultou em um aumento anual da carga para resfriamento de 44,7 a 181,1 kWh/m<sup>2</sup>/ano nos lugares de clima quente e seco, com tempestades de poeira moderadas a extremas.

Nos últimos anos tem-se falado muito na influência de materiais de baixa refletância na redução da temperatura superficial das telhas, na redução da temperatura interna e conseqüentemente, na redução do consumo de energia. Esse termo significa um telhado que é projetado para refletir mais radiação solar e para absorver menos energia do que um telhado convencional, isso pode ser feito por uma pintura altamente

reflexiva, por uma manta ou por telhas altamente reflexivas. Estudos demonstram que coberturas com essas características reduzem a transferência de calor para o interior da edificação e reduzem o consumo de energia.

PARKER; BARKASZI JR (1997) realizaram experimentos em nove edificações residenciais de 1991 a 1994, utilizando protocolo de teste antes e depois dos telhados terem sido branqueados na metade do verão. O uso do condicionador de ar reduziu de 2 a 43% para os diversos sítios. A redução média no uso de energia para condicionamento térmico foi de 19% e a redução do consumo de energia no horário de pico para cinco edificações foi de 22%. Os autores concluíram que o uso de telhados reflexivos na Flórida representa uma opção atrativa para reduzir o consumo de energia para resfriamento. Os dados coletados sugerem que economias de até 40% podem ser realizadas em telhados pouco isolados.

Materiais com alto albedo quando expostos a radiação solar, refletem mais energia do que absorvem. PRADO e FERREIRA (2005) estudaram o efeito da refletância de diferentes tipos de telhas (com cores diferentes), com diferentes albedos, nas ilhas de calor em centros urbanos. Os resultados indicam que para cada faixa do espectro solar pode ser observado que alguns materiais mostram baixa refletância na parte visível, mas apresentaram alta refletância no infravermelho, atingindo assim altos valores de albedo. Telhas cerâmicas vermelhas mostraram refletância na parte visível de 33% e de 78% na parte infravermelha, proporcionando uma refletância aproximada de 67%. O oposto aconteceu com a amostra de aço inox, que mostrou refletância a luz visível de 46% e de 37% na parte infravermelha. Quanto ao efeito pelo envelhecimento, a exposição ao tempo tende a diminuir a refletância de materiais claros e aumentar a refletância de materiais escuros.

O uso de coberturas refletivas é uma estratégia que tem ganho popularidade por ser uma solução de resfriamento passivo em edificações. ZINGRE et al. (2015) desenvolveu um método de transferência de calor em *cool roof* (CRHT), o qual foi desenvolvido utilizando o método da aproximação espectral. O modelo foi validado através de medições experimentais em dois apartamentos idênticos com telhado de concreto em Singapura. Os resultados mostraram que em um dia de sol, a pintura reflexiva com refletância solar de 0,74, reduziu a temperatura de pico do telhado em 14,1 °C, a temperatura do ar interno em 2,4 °C e o ganho térmico em 54%. Além disso, os resultados do modelo apresentaram resultados coerentes com os obtidos pelas medições.

ZINGRE, WAN e YANG (2015) desenvolveram um método de estimar o valor de transferência térmica em telhados (RTTV) através de

uma nova formulação para modelar o aumento da resistência térmica equivalente devido ao efeito da refletância solar em telhados opacos utilizando o método de transferência de calor em *cool roof* (CRHT). A nova formulação incorporou a estimativa dos valores de transmitância térmica (*U-value*) no ganho térmico por condução. O modelo RTTV foi validado através de comparações com simulação computacional e de ensaios experimentais em uma edificação com telhado plano de concreto e com o espaço interno condicionado, em Singapura. O modelo RTTV desenvolvido nesse estudo é mais preciso do que os outros modelos utilizados em Singapura, com erro máximo de 12%.

GARG et al. (2016) desenvolveram um método de cálculo para determinar os benefícios de coberturas com valores de albedo alto sob condições variadas na Índia, em Nova Deli. Os parâmetros de localização, tipo de edificação, área do telhado, e propriedades da superfície foram utilizados como dados de entrada. Simulações anuais no *EnergyPlus* foram realizadas para os parâmetros de entrada. Os resultados mostraram que podem ser economizados 23 kWh/m<sup>2</sup>-ano com a aplicação de um telhado com refletância solar de 0,80. Em edificações não condicionadas, a redução máxima na temperatura foi de 3,9°C para o mês de maio e observou-se uma redução no voto médio predito de Fanger entre 0,6-1,6.

O estudo desenvolvido por PISELLO, ROSSI e COTANA (2014) mostrou o efeito da refletância de telhas cerâmicas no comportamento térmico do telhado e no desempenho térmico de uma casa sem o uso de condicionamento térmico, na região central da Itália. Para realizar a comparação, o experimento teve a duração de dois anos, o primeiro ano apresentou a situação original da casa e no segundo ano as telhas foram substituídas pelas telhas produzidas para realizar a pesquisa durante o período de verão e de inverno. Foram avaliados a capacidade de refletância do telhado, o desempenho térmico do telhado e a avaliação do ambiente interno. Resultados mostraram que durante o verão a temperatura média superficial das telhas diminuiu mais de 10°C devido à alta refletância das telhas e a temperatura de operação interna diminuiu mais de 3°C. Durante o inverno, a temperatura média superficial das telhas diminuiu aproximadamente em 1°C.

SUEHRCKE, PETERSON e SELBY (2008) desenvolveram uma equação para avaliar a média diária de fluxo de calor descendente em um telhado. Os resultados sugerem que para o norte da Austrália, um telhado de cor clara apresente cerca de 30% a menos do ganho térmico de um telhado de cor escura. O efeito do tempo foi considerado nas equações.

PARKER, SONNE e SHERWIN (1998) realizaram um experimento no qual avaliaram o efeito de materiais de cobertura com alta

refletância, comparando os resultados com o caso padrão (com telhas escuras) e com isolamento térmico R-19 e ático não ventilado, no sul da Flórida (EUA). No total foram avaliadas sete amostras de coberturas. Concluiu-se que as amostras que apresentavam sistemas de cobertura branca altamente reflexiva proporcionaram redução no consumo de energia anual de 18-26%. Telhas terra cota apresentaram economia modesta, de 3 a 9% e pintura branca de 3-5%. A amostra com isolamento térmico proporcionou redução no consumo de energia de 6-11%. Os sistemas de cobertura altamente reflexivos mostraram redução no consumo de energia para o horário de pico de 28 a 35%.

#### ✓ Isolamento térmico

O uso de isolamento térmico tem o objetivo de dificultar a transferência de calor de um objeto/superfície/corpo para outro por condução, convecção e radiação. Para reduzir a transferência de calor de um corpo para o outro é necessário instalar algum material entre eles que não seja um bom condutor térmico, um material cuja condutividade térmica seja baixa em relação à dos materiais usuais.

Em áreas de clima tropical, o isolamento térmico em edificações pode ser utilizado para diminuir o ganho térmico, reduzir a temperatura interna, reduzir o gasto com energia e incentivar a conservação de energia associada aos recursos naturais. (DOE, 2002).

Conforme AL-HOMOD (2005) o isolamento térmico é formado por um material ou combinação destes, quando aplicados corretamente retardam a passagem do fluxo de calor que atravessa o envelope da edificação por condução, convecção e/ ou radiação. A resistência térmica destes materiais é devida principalmente à grande quantidade de ar presente entre as fibras ou confinado nas pequenas células formadas no processo de expansão das espumas e dos isolantes granulares. Algumas espumas podem conter ainda nos seus poros outros gases, com condutividade menor que a do ar, dificultando ainda mais a passagem do calor.

Os principais tipos de isolamentos térmicos são: materiais inorgânicos, orgânicos e metálicos ou membranas refletivas. No primeiro existem os materiais fibrosos e celulares, como fibra de vidro e lã rocha, silicato de cálcio e vermiculite. O segundo grupo também se divide em dois, materiais fibrosos e celulares, os quais são formados por celulose, algodão, madeira, fibras sintéticas e poliestireno, poliuretano e outros polímeros. No último grupo se encontram as mantas formadas por um material de baixa emitância térmica.

AL-SALLAL (2003) realizou um estudo para avaliar a redução no consumo de energia para aquecimento e resfriamento pelo uso de isolantes térmicos (poliestireno e fibra de vidro) para dois climas diferentes. Foram realizadas simulação no programa RENCON, o qual é empregado para estimar a necessidade de aquecimento e resfriamento anual. Foram realizadas simulações com diferentes níveis de isolamento (de 0,88 m<sup>2</sup>K/W a 5,28 m<sup>2</sup>K/W) para duas localizações diferentes (Texas e Minnesota). O melhor custo-benefício para as duas regiões foi o uso de poliestireno com a menor resistência térmica ( $R= 0,88 \text{ m}^2\text{K/W}$ ). Os autores também concluíram que o investimento em isolamento térmico para climas frios apresentou retorno mais rápido quando comparado com climas quentes.

PASSOS (2016) realizou um estudo para avaliar o impacto do uso de isolamento térmico (50 mm de lã de vidro) nas condições internas de edificações de interesse social e nas diferentes condições climáticas no Brasil através da simulação computacional pelo programa *EnergyPlus 8.1*. Foram selecionadas oito cidades, uma de cada região bioclimática brasileira. Para cada cidade foram estudadas seis situações diferentes de isolamento térmico cujas configurações foram: 1) sem isolamento nas paredes, no teto e no telhado; 2) com isolamento nas paredes somente; 3) com isolamento no telhado apenas; 4) com isolamento nas paredes e no telhado; 5) com isolamento apenas no teto; 6) com isolamento no teto e nas paredes.

De forma geral, o uso de isolamento térmico em habitações de interesse social foi benéfico para as condições climáticas do Brasil. Em locais como Teresina e Recife, onde as temperaturas são mais elevadas e há desconforto pelo calor, os casos 3 e 5 (isolamento na cobertura) apresentaram os melhores resultados, gerando menor consumo de energia e menor porcentagem de desconforto pelo calor. Em Curitiba, Santa Maria e São Paulo a configuração que se mostrou mais vantajosa em relação ao consumo de energia e ao conforto térmico foi com o isolamento nas paredes e sobre a laje. Para o clima de Brasília e Vitória da Conquista o caso 4 foi o que apresentou melhores resultados.

- ✓ Isolamento térmico reflexivo (ou barreira radiante)

Outra maneira de reduzir os ganhos térmicos vindos da cobertura pode ser encontrada ao utilizar materiais que contenham baixa emitância térmica, como os metálicos, emitindo pouco calor para o interior da edificação e refletindo a maior parte da radiação incidente. Os materiais que desempenham esta função na construção civil, geralmente são

chamados de isolantes térmicos reflexivos ou de barreiras radiantes, pois dificultam a passagem do calor por radiação. As barreiras radiantes fazem isso através da redução da emissão e da reflexão da radiação incidente. (MEDINA, 2000b; MIRANVILLE et al., 2003).

O material comumente utilizado é o alumínio aplicado em um ou nos dois lados da manta, seja na forma laminada ou evaporado à vácuo. O alumínio é aplicado em conjunto com outro material, como o papel Kraft, filmes plásticos e papelão, entre outros, a fim de facilitar a resistência mecânica e o manuseio do material (RIMA-I, 2014).

Para DESJARLAIS (2010) e FAIREY (1994b) barreiras radiantes são materiais que reduzem os ganhos térmicos no verão, por reduzir a emissão da radiação de onda longa, diminuindo o consumo de energia para o resfriamento da edificação, bem como a temperatura interna da edificação. As barreiras radiantes são mantas finas, formadas por um material altamente reflexivo e com baixa emitância térmica, normalmente de 0,05

Em coberturas, o isolamento térmico reflexivo é utilizado para reduzir a transferência de calor por radiação entre as telhas e o forro (ou laje) da edificação. O bom desempenho de uma barreira radiante está associado a algumas propriedades, chamadas de emitância térmica e refletividade. Quanto maior o poder de reflexão da radiação e menor o poder emissivo de um material, melhor será a barreira radiante. Este tipo de isolamento é formado por um material que dificulta a transferência da radiação infravermelha de onda longa através de uma camada de ar. Estes materiais realizam isto pela reflexão da radiação incidente e, ao mesmo tempo, pela não emissão de energia. (FAIREY, 1994b; RIMA-I, 2014).

As barreiras radiantes podem ser instaladas em quaisquer tipos de edificações: em residenciais, comerciais e industriais. Também podem ser instaladas em edificações que já possuem algum tipo de isolante térmico, sem a necessidade da retirada deste. Em edificações residenciais, a barreira radiante pode ser instalada de duas maneiras diferentes: pregada nos caibros do telhado, acompanhando a inclinação do mesmo ou pode ser utilizada horizontalmente sobre o forro ou laje.

Muitos estudos foram realizados para avaliar o desempenho térmico de coberturas com barreiras radiantes através de trabalhos experimentais, teóricos e de simulações. Os estudos que seguem abaixo se referem a trabalhos experimentais (em campo e em laboratório), a modelos teóricos e a simulações. MEDINA (2000b) realizou experimentos e simulações computacionais para avaliar o desempenho térmico barreiras radiantes utilizadas simultaneamente com de três diferentes níveis de isolamento térmico condutivo. Os experimentos

foram conduzidos no Texas (USA) comparando os resultados de duas residências iguais. Os resultados mostraram que coberturas com alto nível de isolamento térmico condutivo associado ao uso de barreiras radiantes apresentaram pior desempenho térmico do que as que possuem baixo nível de isolamento condutivo associado ao uso de barreiras radiantes.

Os ensaios realizados durante o verão demonstraram que a barreira radiante associada a:

- uma cobertura com resistência térmica de  $1,94 \text{ m}^2\text{K/W}$  houve redução na transferência de  $42\%$  no fluxo de calor;
- uma cobertura com resistência térmica de  $3,35 \text{ m}^2\text{K/W}$  a redução na transferência de calor foi de  $34\%$  e;
- uma cobertura com resistência térmica de  $5,28 \text{ m}^2\text{K/W}$  a redução na transferência de calor foi de  $25\%$ .

Quando às simulações, esses resultados foram de  $44\%$  (para  $R=1,94 \text{ m}^2\text{K/W}$ ),  $28\%$  (para  $R=3,35 \text{ m}^2\text{K/W}$ ) e  $23\%$  (para  $R=5,28 \text{ m}^2\text{K/W}$ ).

D'ORAZIO et al. (2013) desenvolveram um estudo para entender se, no clima quente e temperado, o isolamento reflexivo pode ser eficaz quando usado com grande nível de isolamento térmico. Para tanto, comparou o desempenho térmico de um telhado com e sem isolamento reflexivo, ambos instalados em uma edificação em escala real com  $12 \text{ cm}$  de EPS, próximo de Ancona (Itália), durante o período de verão. Os resultados mostraram que os benefícios de isolamento reflexivo são um pouco limitados quando usado o nível de isolamento imposto pelas normas vigentes no local, que consideram o isolamento por condução como a principal estratégia para economia de energia em climas temperados e quentes.

MIRANVILLE et al. (2008) elaboraram uma metodologia para determinar a resistência térmica de um sistema padrão de telhado com barreira radiante. A metodologia foi baseada no desenvolvimento de um modelo matemático implementado em um código de simulação chamado de ISOLAB, e também por resultados experimentais em uma célula teste, exposta ao ambiente externo. O valor da resistência térmica ( $3 \text{ m}^2\text{K/W}$ ) confirmou o potencial de barreiras radiantes como isolantes térmicos para climas tropicais.

CRAVEN e GARBER-SLAGHT (2011) avaliaram a eficácia de isolamentos térmicos reflexivos para o clima frio, através do uso de isolamentos de EPS (espessura de  $1 \text{ polegada}$ ) com as duas faces aluminizadas. O material utilizado foi de dois fabricantes (P2000 e R-Tech®). O Equipamento utilizado para realizar as medições foi o FOX-314, que mede o fluxo de calor com a finalidade de verificar a

condutividade térmica dos produtos. Os ensaios foram realizados com temperatura da placa quente de 95° F e a placa fria de 55°F. O isolamento P2000 é um EPS com faces reflexivas e possui a resistência térmica dentro do esperado para este tipo de isolamento. Ao introduzir uma camada de ar de uma polegada entre a placa de gesso e a amostra P2000 com superfície reflexiva, o R-value aumentou de 0,29 m<sup>2</sup>K/W para 1,007 m<sup>2</sup>K/W. A amostra R-Tech, ao introduzir a camada de ar, o R-value aumentou de 0,29 m<sup>2</sup>K/W a 0,97 m<sup>2</sup>K/W. Em termos da resistência térmica total para a amostra da parede, é uma contribuição irrelevante em climas frios como no Alasca, onde o isolamento mínimo prescrito para construções é de R-20 a R-35. Baseado em amostras analisadas, não há evidências que P2000 pode proporcionar grande melhora no desempenho térmico comparado ao esperado para o EPS.

Em construções de clima frio, quando considerado o isolamento reflexivo para reduzir as perdas térmicas, o potencial é baixo. Em ensaios laboratoriais, onde a diferença de temperatura é de 40°F e o fluxo de calor é no sentido de baixo para cima, superfícies reflexivas adicionam um pequeno aumento no R-value. Quando existe uma camada de ar associada a um material de baixa emitância térmica há um aumento na resistência térmica.

ESCUADERO et al. (2013) realizaram experimentos para determinar a resistência térmica de barreiras radiantes com o uso de condutímetro do tipo fluximétrico e através do dispositivo Caixa Quente Protegida. O condutímetro foi utilizado para caracterizar a camada de isolamento enquanto a Caixa Quente Protegida foi utilizada como uma ferramenta para determinar a resistência térmica de um componente da edificação, incluindo a barreira radiante. O isolamento térmico utilizado nesta pesquisa apresentou as duas faces com um material reflexivo. As medições foram realizadas no condutímetro de duas formas diferentes, com apenas uma camada de ar e com duas camadas de ar. Os resultados foram comparados com os de um modelo analítico de transferência de calor de acordo com a norma ISO 6946 e com um modelo computacional *Fluid Dynamic (CFD model)*. A principal conclusão é que os testes laboratoriais são válidos para a caracterização térmica de barreiras radiantes. Também que a resistência térmica de barreiras radiantes pode ser estimada com precisão utilizando a metodologia simplificada da ISO 6946, bem como os valores das propriedades térmicas de materiais reflexivos, como a emitância térmica e a condutividade.

MIRANVILLE et al (2012) realizaram um estudo na ilha Reunião (França), onde sistemas multi-reflexivo de barreiras radiantes

são comumente usados. O desempenho térmico de barreiras radiantes foi avaliado através de medições em campo. Para tanto foi construído um protótipo, chamado de célula LGI. A resistência térmica da cobertura foi analisada para o inverno e para o verão, com ático ventilado e não ventilado. Conclui-se que no verão, a resistência térmica possui pouca relação com a taxa de ventilação ( $R=1,44 \text{ m}^2\text{K/W}$ ), pois a mesma não apresentou significativa variação. Já no inverno, períodos de fortes ventos na região, a resistência térmica sem ventilação do ático foi de  $1,66 \text{ m}^2\text{K/W}$  e com ventilação natural a resistência térmica foi  $6,24 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Com base nesses resultados os autores investigaram o efeito da ventilação forçada na resistência térmica do telhado e verificaram que conforme aumentavam a taxa de ventilação, a resistência térmica também aumentava, mostrando grande dependência do desempenho térmico do telhado com as condições de vento na camada de ar superior do telhado.

ASADI e HASSAN (2014) examinaram a redução das cargas de aquecimento e refrigeração que pode ser atribuída ao uso de barreira radiante no ático e identificaram os parâmetros ambientais que influenciam essa redução. Um estudo experimental foi conduzido por 8 meses em Zachary (Louisiana) em duas casas construídas ao mesmo tempo e instrumentadas com termopares do tipo T. O forro das duas casas era composto por isolamento R-30, sendo que a única diferença entre elas é a presença de barreira radiante em uma das edificações. Resultados mostraram que um ático com barreira radiante pode reduzir as cargas de energia entre 8 e 25%, dependendo das condições climáticas.

#### ✓ Resfriamento radiativo por meio de metamaterial

O planeta terra possui a temperatura média de aproximadamente  $14^\circ\text{C}$  e para manter-se em condições de vida para todos os seres que nela habitam, passa por um processo diário de resfriamento radiativo noturno.

No que se refere ao resfriamento radiativo como técnica de resfriamento passivo em edificações geralmente se usa a cobertura da edificação para promover as trocas térmicas, como por exemplo, coberturas de alta massa térmica com painéis móveis, os quais podem ser abertos durante a noite, expondo a superfície de alta massa térmica para as trocas radiantes com a atmosfera. Outros exemplos são coberturas metálicas leves e coberturas do tipo coletor solar (com sistema de tubulações de água, em que a água resfria durante a noite e conseqüentemente resfria a laje de concreto, tornando-a uma superfície absorvedora do calor interno. Estas técnicas requerem o período noturno para serem eficazes.

Um grande desafio para os pesquisadores até alguns anos atrás foi promover o resfriamento radiativo também durante o período diurno. Recentemente pesquisadores divulgaram um estudo sobre o desenvolvimento de uma película que tem o objetivo de realizar o resfriamento radiativo em edificações 24 horas do dia e sem consumir energia (ZHAI et al., 2017). Esta película é um metamaterial, fabricado de polimetilpenteno com a adição de pequenas esferas de vidro, e com uma lâmina de prata em apenas um dos lados, configurando uma espessura total de 50 micrômetros de metro. Ao inserir esta película sobre a cobertura, o lado prateado deve ficar para baixo, o qual tem a função de refletir a radiação solar enquanto que o metamaterial é totalmente transparente para o espectro solar tem a função de transformar a radiação solar no comprimento de onda transparente à janela atmosfera, sendo assim, ele é devolvido ao espaço sem gerar o aquecimento das superfícies. O metamaterial mostrou um poder de resfriamento radioativo de 93 watts por metro quadrado sob a luz direta do sol.

O potencial de economia de energia através do uso de um sistema híbrido, o qual utiliza o metamaterial para resfriamento radiativo e sistema convencional de condicionamento de ar em uma edificação unifamiliar de dois andares, foi investigado através de simulação computacional no programa *EnergyPlus*, para quatro cidades dos Estados Unidos. Os resultados mostraram que o sistema híbrido pode economizar uma carga anual de resfriamento de 26% a 46% nas cidades analisadas, sob uma restrição de um período de retorno de oito anos.

BAO et al. (2017) propõem um metamaterial formado por duas camadas, uma de partículas  $\text{TiO}_2$  e outra de  $\text{SiO}_2$  ou  $\text{SiC}$  altamente compactadas. Este metamaterial foi aderido a dois substratos, um em alumínio e outro na cor preta. No substrato em alumínio, a refletividade total do  $\text{TiO}_2 + \text{SiO}_2$  no espectro solar atingiu 90,7% e a emissão na “janela do céu” é de 90%. Sob condições de ar seco, a potência de resfriamento do metamaterial aderido a substrato em alumínio pode atingir  $17^\circ\text{C}$  abaixo da temperatura ambiente noturna e  $5^\circ\text{C}$  abaixo da temperatura ambiente diurna.

### 2.2.2 Resistência térmica

Resistência térmica (R) de um material está associada à dificuldade deste em transferir calor. Em um material homogêneo pode ser escrito pela Equação 17.

$$R = \frac{L}{\lambda} \quad (17)$$

onde:

R = resistência térmica do material ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )

L = espessura do material (m)

$\lambda$  = condutividade térmica do material ( $\text{W}/\text{mK}$ )

#### – Valor R (R-value) ou Resistência equivalente

O valor-R (R-value) mostra a eficácia do isolamento térmico. É um valor que mostra o acréscimo na resistência térmica em um sistema. Por exemplo, a cobertura de uma edificação possui uma determinada resistência térmica, ao instalar o isolamento térmico, aumentará a resistência térmica da cobertura. O valor-R é justamente este “acréscimo” de resistência térmica.

$$\text{Valor-R (ou R-value)} = R_{\text{com isolamento}} - R_{\text{semisolamento}}$$

Onde:

Valor-R (ou R-value) = Acréscimo na resistência térmica;

$R_{\text{comisolamento}}$  = Resistência da cobertura com isolamento térmico;

$R_{\text{semisolamento}}$  = Resistência da cobertura sem isolamento térmico.

Este valor varia com o tipo do material, com a espessura e com a densidade do produto. Em alguns países, como os Estados Unidos, todos os produtos isolantes por condução apresentam esse valor escrito na embalagem do mesmo, facilitando a escolha pelo consumidor.

#### – Resistência de câmaras de ar fechadas

Um exemplo prático da resistência térmica proporcionada pelo ar é o isolamento térmico proporcionado pelas janelas de vidro duplo. Sabe-se que o ar é um bom isolante térmico (baixa condutividade térmica), e sua presença aumenta a resistência térmica do sistema. Dentro de espaços fechados com um meio transparente médio há duas formas de transferência de calor: por convecção e por radiação. A resistência térmica total dependerá da orientação e dimensão da camada de ar, do sentido do fluxo de calor, da emitância térmica das superfícies e da temperatura de todas as superfícies da camada de ar (SABER, 2012).

A tabela 3, do capítulo 26 da ASHRAE (2009) apresenta valores para a resistência térmica de câmaras de ar fechadas para diferentes posições da câmara de ar (horizontal, inclinada e vertical), sentido do fluxo de calor, diferentes diferenças de temperatura e temperaturas médias, diferentes valores de emitância térmica efetiva e diferentes espessuras da câmara de ar.

SABER (2014, a e b) traz correlações práticas para resistência térmica de espaços de ar fechados e horizontais, com fluxo de calor descendente para aplicações em edificações. Na primeira parte do estudo, o autor desenvolveu simulações numéricas para prever a resistência térmica de espaços horizontais e fechados, com diferentes espessuras (13, 20, 40 e 90 mm) e com a emitância térmica efetiva variando de 0,03 a 0,82 e com o fluxo de calor de cima para baixo. Os resultados obtidos foram comparados com os fornecidos pela tabela da ASHRAE (2009). Para as espessuras de 13 e 20 mm valores de resistência térmica estavam em concordância com os da ASHRAE, variando de +2,6% a -4,2% para a espessura de 13 mm e +2,3% a -6% para a espessura de 20 mm. No entanto, para a espessura de 40 e 90 mm o desvio máximo entre os valores de resistência térmica da ASHRAE e os preditos foi de +12,1% e -7,6% para 40 mm e de 42,6% e -13,4% para 90 mm.

A dependência do R-value no aspecto de forma da camada de ar fechada também foi investigada para diferentes condições. Os resultados mostraram que o efeito do fator de forma no R-value para câmara de ar horizontal e fechada com fluxo de calor de cima para baixo foi significativo, em particular para menores espessuras da camada de ar.

Considerações também foram dadas para quantificar o potencial de aumento do R-value para espaços de ar fechados quando uma fina camada com diferentes emitâncias térmicas foi instalada horizontalmente no meio da espessura da camada de ar. Os resultados mostraram que dependendo do valor da emitância térmica efetiva e da espessura da camada de ar, o R-value pode dobrar.

Na segunda parte do estudo, foram desenvolvidas correlações práticas para determinar o R-value de espaços de ar horizontais e fechados, com fluxo de calor de cima para baixo, para diferentes espessuras, relação de forma, temperatura média, diferença de temperatura dentro da camada de ar e emitância térmica efetiva. Os resultados mostraram que o R-value calculado usando a correlação estão em bom acordo com os valores preditos, dentro de  $\pm 1\%$  para espessura de 13 mm,  $\pm 1,5\%$  para 20 mm,  $\pm 3\%$  para 40 mm e 90 mm.

SABER (2013c) realizou um estudo similar ao anterior, porém, com o sentido do fluxo de calor ascendente. Os objetivos do estudo eram

investigar o potencial de aumento no R-value para um espaço de ar fechado quando uma fina manta com emitância térmica efetiva variando entre 0,03 e 0,82 foi instalada horizontalmente no meio da camada de ar, investigar o efeito da relação de forma no R-value de um espaço de ar horizontal fechado para diferentes espessuras (13, 20, 40 e 90 mm) para uma grande faixa de variação de emitância térmica efetiva (0,03 – 0,82), comparar o R-value predito com os dados fornecidos pela tabela da ASHRAE (capítulo 26, 2009) para espaços de ar com diferentes espessuras, temperatura média, diferença de temperatura e emitância térmica efetiva e desenvolver correlações práticas para R-value de camadas de ar fechadas com uma grande faixa de valores de relação de forma, temperatura média, diferença de temperatura e emissividade efetiva para uso subsequente em modelos de simulação de energia disponíveis.

Os resultados da comparação entre a situação de uma cavidade e a de duas cavidades foi realizada para a espessura da cavidade de 90 mm e de 40 mm. Os resultados mostraram que a velocidade do ar é sempre maior para o caso de uma cavidade do que o caso de duas cavidades e quando se reduz a espessura, aumentam as correntes de convecção. Para a espessura de 90 mm, haviam duas correntes de convecção para uma cavidade e quatro correntes de convecção para duas cavidades. Quando se reduziu a espessura, a velocidade do ar diminuiu dentro da cavidade e as correntes de convecção aumentaram para 8 quando se tem uma cavidade e para 14 quando se tem duas cavidades. Correntes fortes de convecção podem resultar em maior transferência de calor. Conseqüentemente, uma maior redução na resistência térmica pode ocorrer para uma cavidade quando comparado com duas cavidades, se os dois têm um mesmo número de correntes de convecção por unidade de comprimento.

Em relação à comparação dos resultados obtidos com uma cavidade e as tabelas da ASHRAE, para todos os valores de espessura, temperatura média e diferença de temperatura o R-value predito estava em bom acordo com os da ASHRAE. Este estudo ainda mostrou que o efeito do fator de forma no R-value para câmaras de ar retangulares, fechadas e horizontais, com fluxo de calor ascendente, não é tão significativo como o encontrado para camadas de ar fechadas e verticais.

Na última parte do artigo, correlações práticas foram realizadas para determinar o R-value de câmara de ar fechada e horizontal para diferentes espessuras e para uma grande faixa de valores para diferentes parâmetros, como: fator de forma, diferença de temperatura através da cavidade de ar, temperatura média, e emissividade efetiva. O R-value

calculado utilizando esta correlação está em bom acordo com o R-value predito.

O efeito do sentido do fluxo de calor (ascendente e descendente) na resistência térmica para câmaras de ar horizontais e fechadas foi avaliado por SABER (2014 a e b). O autor realizou ensaios para câmaras de ar de uma cavidade e com duas cavidades (quando se instala uma manta no meio). Um sistema com o fluxo de calor na direção de cima para baixo pode resultar em uma estratificação estável do ar dentro da cavidade e apresentar maior valor de resistência térmica. Este fato deve-se ao coeficiente de transferência de calor por convecção ser menor devido a menor velocidade ao ar dentro da cavidade resultando em maior resistência térmica quando comparado com o sistema com o fluxo de calor no sentido de baixo para cima.

Os resultados mostraram que para os mesmos valores de comprimento, espessura, emissividade efetiva, temperatura média e diferença de temperatura, resultou em maiores valores de resistência térmica para duas cavidades do que para uma cavidade, em função de que em duas cavidades, o efeito reduziu o diferencial de temperatura através das cavidades resultou em correntes de convecção mais fracas (menor velocidade do ar) ultrapassando o efeito negativo do aumento do número de correntes de convecção, resultando em um maior valor de resistência térmica para o caso de duas cavidades quando comparado com o caso de uma cavidade. Também foi evidenciado que a velocidade do ar na camada de ar com o fluxo de calor no sentido ascendente é muito maior do que na camada de ar com o fluxo descendente e que para os dois sentidos do fluxo de calor, a velocidade do ar para uma cavidade é maior do que para duas cavidades.

SABER (2012) realizou uma investigação para conhecer a contribuição de isolamento reflexivo na resistência térmica de câmaras de ar. A pesquisa teve início quando ele comparou os resultados de simulações desenvolvidas pelo *National Research Council Canada* com os resultados obtidos experimentalmente pelo *Cold Climate Housing Research Center (CCHRC)*.

Verificou-se que os resultados obtidos através das simulações foram maiores do que os obtidos através de experimentos. Assim, surgiu uma dúvida sobre o motivo dos valores obtidos pela simulação serem maiores do que os obtidos experimentalmente por aproximadamente a mesma porcentagem para os diferentes isolamentos reflexivos utilizando a ASTM C-518 com equipamento FOX-314.

A conclusão foi relacionada a não uniformidade do fluxo de calor nas superfícies, ou seja, o fluxo de calor medido não representou o fluxo

de calor total que atravessou a amostra. Nesse caso, usando o fluxo de calor medido para calcular o R-value experimental poderia resultar e subestimação. O autor mencionou o fenômeno de não uniformidade do fluxo de calor no aparato em combinação com o tamanho reduzido dos transdutores de fluxo de calor. Essas são as possíveis explicações para a diferença entre o R-value calculado do medido.

Nesse estudo o autor verificou a influência de diferentes ângulos na resistência térmica do sistema (horizontal, inclinado 30° e vertical) e com diferentes sentidos do fluxo de calor em cada uma delas. Aumentado a emissividade do foil de 0,05 para 0,90, a resistência térmica equivalente diminuiu 20,7% e 8,2% para amostras horizontais aquecidas na parte de cima e de baixo, respectivamente. Para a inclinação de 30°, o aumento na emissividade de 0,05 para 0,90 resultou em uma redução da resistência de 15% e 9,5% para a amostra aquecida na parte de cima e baixo, respectivamente. Para amostras verticais, aumentando a emissividade na mesma proporção acima, a resistência equivalente diminuiu em 11%.

### **2.2.3 Síntese da revisão de literatura**

O estudo para o desenvolvimento da tese abrangeu, em um primeiro momento, a conceituação física de transferência de calor, e em um segundo momento, envolveu a leitura de artigos científicos que tratam da transferência de calor em coberturas. Com base nos artigos lidos e nos noticiários divulgados nos últimos anos, um dos maiores desafios previstos para o futuro do planeta está relacionado com a produção e à redução no consumo de energia, uma vez que mais da metade da população mundial vive em áreas urbanas e 80% vive nos países em desenvolvimento, nos quais as atividades relacionadas a construção nunca foram intensas.

Aproximadamente 60% do consumo mundial de eletricidade ocorrem nas edificações residenciais e comerciais, sendo que na América Latina esse valor é de 42% (UNEP, 2013). No cenário brasileiro, o Balanço Energético Nacional (BEN, 2015) revelou que as edificações são responsáveis pela demanda de aproximadamente 50% do total da eletricidade consumida.

Esses valores elevados evidenciam uma possibilidade de redução no consumo de energia, e por isso adotar técnicas que incentivem a melhoria do desempenho energético das edificações não está relacionado somente a implementação de equipamentos e sistemas mais eficientes, mas também envolve decisões construtivas e escolha de materiais que aprimorem o desempenho térmico do envelope construído.

Em regiões de clima quente é de extrema importância pensar em maneiras de reduzir o ganho térmico da edificação, e uma delas é através da cobertura, considerando que em construções horizontais essa superfície é a mais exposta à radiação solar e, portanto, responsável pela maior parcela da transferência do calor para o interior.

Os estudos que avaliaram o desempenho térmico e energético de coberturas o fizeram utilizando simulações computacionais (AL-SALLAL, 2003; GAGLIANO et al., 2012; GARG et al., 2016; SAILOR, 2008; SANTAMOURIS et al., 2007; YAGHOUBIAN; SREBRIC, 2015), desenvolvimento de modelos matemáticos (AL-SANEA, 2002; ALGARNI; NUTTER, 2015; BARRIO, 1998; BEN CHEIKH; BOUCHAIR, 2004; DOS SANTOS; MENDES, 2015; LI et al., 2016; ZINGRE et al., 2015a), medições em edificações de dimensões reais (ASADI; HASSAN, 2014; BEVILACQUA et al., 2015; D’ORAZIO et al., 2013; D’ORAZIO; DI PERNA; DI GIUSEPPE, 2010; DIMOUDI; ANDROUTSOPOULOS; LYKOUDIS, 2006; DIMOUDI; LYKOUDIS; ANDROUTSOPOULOS, 2006; JIM, 2014; MICHELS; LAMBERTS; GÜTHS, 2008a; PARIZOTTO; LAMBERTS, 2011; PARKER; BARKASZI JR, 1997; PISELLO; ROSSI; COTANA, 2014) e em células-teste (ALVARADO; MARTÍNEZ, 2008; ALVARADO; TERRELL; JOHNSON, 2009; BELUSKO; BRUNO; SAMAN, 2011; COMA et al., 2016; D’ORAZIO et al., 2008; LIN; LIN, 2011; MIRANVILLE et al., 2012; TIBERIO CARDOSO; VECCHIA, 2014; ZHANG et al., 2015). Sendo que alguns destes estudos compararam os resultados obtidos por diferentes métodos com a finalidade de validação de modelos, conforme sugerido por (HAUSER et al., 2013) e (MIRANVILLE et al., 2003, 2008).

A utilização de células-teste para a investigação do desempenho térmico de coberturas amplia a possibilidade de análise simultânea envolvendo diferentes tipologias construtivas e isolamentos térmicos. Tal estratégia facilita o controle da temperatura interna e possibilita análises de múltiplas amostras. No entanto, poucos estudos submeteram diferentes coberturas ao mesmo ambiente interno (D’ORAZIO et al., 2013; D’ORAZIO; DI PERNA; DI GIUSEPPE, 2010). A homogeneização da temperatura no ambiente interno do aparato experimental se faz necessária para que todas as coberturas estejam expostas às mesmas condições climáticas, reduzindo erros e possibilitando comparações.

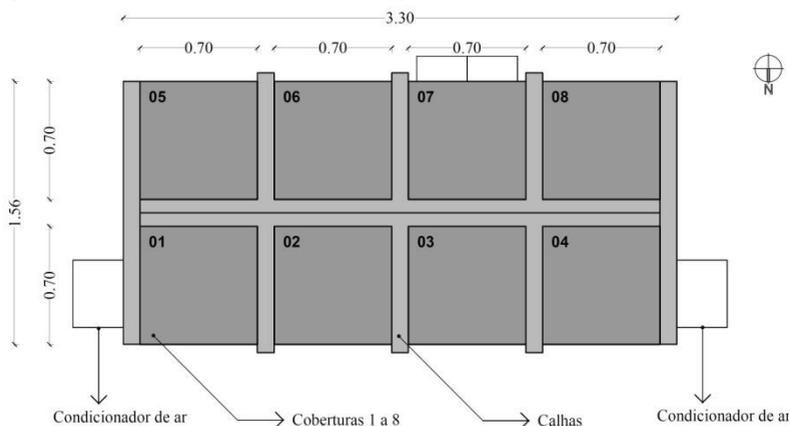
### 3. BANCADA EXPERIMENTAL

Este capítulo foi dividido em subcapítulos, os quais tratam da bancada experimental. Demonstrou-se a construção, a calibração, a metodologia do cálculo da resistência térmica e discutiu-se os resultados obtidos para o Estudo 1 (realizados em 2016) e para o Estudo 2 (realizados em 2017).

#### 3.1 CONSTRUÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

A bancada experimental é uma estrutura que comporta até oito coberturas em escala reduzida. A mesma apresenta a dimensão de 1,56 m de largura e 3,30 m de comprimento conforme planta baixa mostrada na Figura 8. As coberturas possuem a orientação norte para receberem a maior radiação solar possível.

Figura 8: Planta baixa da bancada experimental



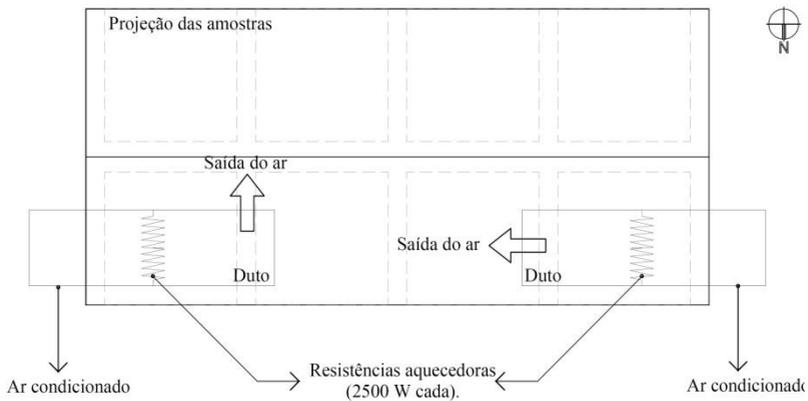
A Figura 9 apresenta uma imagem externa da bancada experimental no momento em que todas as coberturas estavam iguais para a realização da calibração.

Figura 9: Imagem da banca experimental



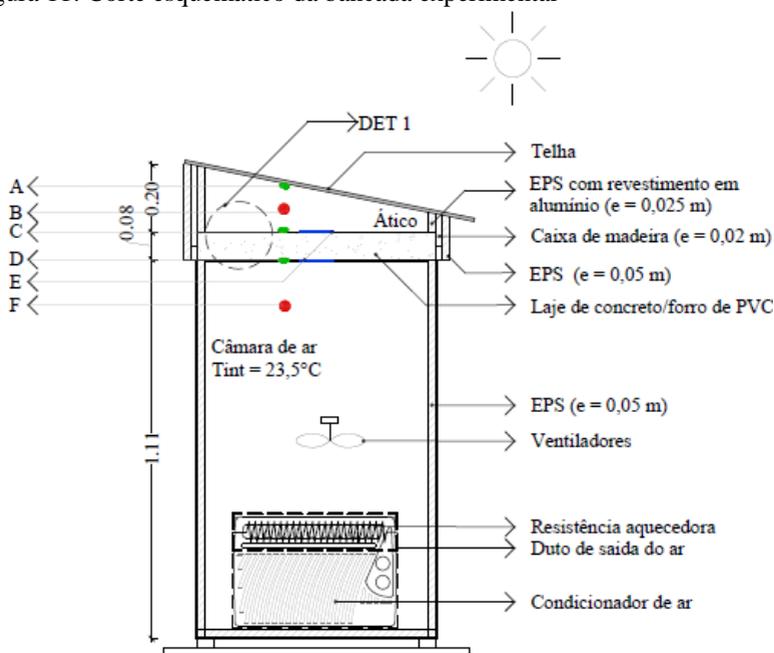
A temperatura do ar no interior da bancada é mantida a  $23.5^{\circ}\text{C}$  com o auxílio de dois condicionadores de ar do tipo “janela” permanentemente ligados e dois bancos de resistências aquecedoras totalizando  $5000\text{W}$  controlados por um sistema PID. A Figura 10 mostra um desenho esquemático dos dutos de saída do ar com a indicação de direção de saída do ar.

Figura 10: Planta baixa com os dutos de saída do ar



Abaixo de cada cobertura foi instalado um ventilador com o objetivo de distribuir uniformemente o ar, visto na Figura 11, que mostra um corte esquemático da bancada experimental.

Figura 11: Corte esquemático da bancada experimental

**LEGENDA**

- A - Temperatura da superfície inferior da telha
- B - Temperatura do ar no ático
- C - Temperatura da superfície superior da laje
- D - Temperatura da superfície inferior da laje
- E - Transdutores de fluxo de calor na superfície superior e inferior da laje
- F - Temperatura do ar na câmara climatizada

Os ventiladores promovem grande velocidade do ar, o que faz com que a resistência térmica da superfície interna ( $R_{s,i}$ ) seja nula. Por este motivo, na face inferior do material que separa o espaço do ático da câmara de ar, foi instalado uma lâmina de poliestireno expandido com a espessura de 5 mm com o objetivo de simular a resistência térmica da superfície interna do ar ( $R = 0,17 \text{ m}^2 \text{ K/W}$ , para fluxo descendente) (ABNT, 2005, parte 3), mostrado na equação 18.

$$R = \frac{e}{\lambda} = \frac{0,005}{0,03} = 0,1666 \text{ m}^2 \text{ K/W} \quad (18)$$

onde:

$R$  = Resistência térmica ( $\text{m}^2\text{K}/\text{W}$ )

$e$  = Espessura (m)

$\lambda$  = Condutividade térmica ( $\text{W}/\text{mK}$ )

As telhas foram fixadas sobre caixas de madeira cujas laterais foram cortadas com a inclinação do telhado, de 20% ou  $11,3^\circ$ . As trocas térmicas pelas laterais da caixa foram reduzidas com a fixação de uma camada de 2,5cm de poliestireno expandido revestido por uma folha de alumínio no interior da caixa e por outra camada de EPS no lado externo, com 5cm de espessura, como pode ser visto na Figura 12 e na Figura 13. O espaço entre as coberturas foi preenchido com espuma e a vedação das telhas foi feita com espuma expansiva, conforme visto na Figura 13. Para evitar o sombreamento de uma bancada sobre a outra, foi projetado um distanciamento de 0,16m (correspondendo ao espaço das calhas).

Figura 12: Isolamento interno das coberturas



Figura 13: Isolamento externo das coberturas e vedação das telhas



Foram realizados dois estudos na bancada experimental, chamados de Estudo 1 e Estudo 2, os quais serão descritos nos itens 3.1.3 e 3.1.4, respectivamente. Durante o Estudo 1 todas as coberturas apresentaram lajes de concreto como o material que separa ático do ambiente interno da bancada, e no Estudo 2 os materiais que fazem esta separação foram o PVC rígido (em seis coberturas) e lajes de concreto (em duas coberturas).

Para uniformizar as temperaturas nas superfícies superior e inferior do material que separa o ático do ambiente interno da bancada, foram instaladas chapas metálicas pintadas de branco com espessura de 2 mm. A Figura 14 e a Figura 15 mostram este detalhe para as coberturas com laje de concreto e para as coberturas com forro de PVC rígido, respectivamente.

Figura 14: Detalhe 1- Laje de concreto com as chapas metálicas e o EPS

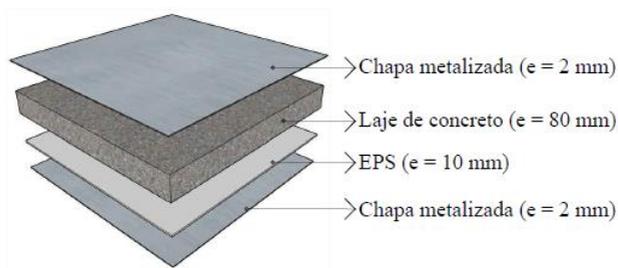
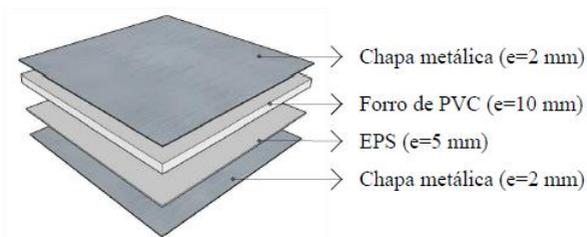


Figura 15: Detalhe 1- Forro de PVC rígido com as chapas metálicas e o EPS



### 3.1.1 Sensores e Sistema de Medição

As coberturas foram instrumentadas com sensores de medição de temperatura e de fluxo de calor cujos sinais foram adquiridos a cada minuto por dois sistemas marca Agilent 34970A conectados a um microcomputador.

#### a) Sensores de Temperatura

Para medir as temperaturas superficiais e do ar foram utilizados termopares do tipo T, AWG 36, os quais foram calibrados com o auxílio de um banho térmico. Os resultados estão mostrados no Apêndice I.

Os termopares utilizados para medição de temperaturas superficiais foram colados ao longo de 50 mm para minimizar efeito de aleta, conforme a Figura 16.

Figura 16: Instalação do sensor para medir a temperatura superficial



Os termopares utilizados para medir a temperatura do ar foram protegidos da radiação do entorno através de um encapsulamento ventilado fabricado com alumínio polido (diâmetro =20 mm), conforme mostrado na Figura 17 e na Figura 18.

Figura 17: Encapsulamento do termopar para medição da temperatura do ar

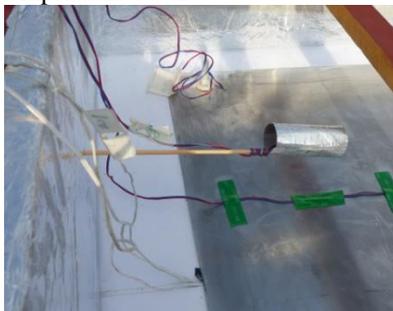
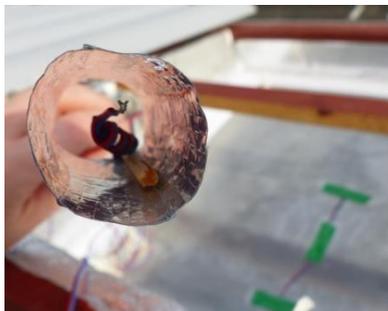


Figura 18: Detalhe do termopar dentro da capsula

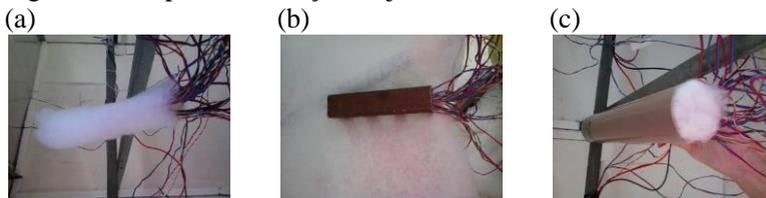


Todos os termopares foram inseridos em duas juntas de referência, instaladas dentro da própria bancada com a temperatura medida por um termistor NTC-30K.

A Figura 19 apresenta as etapas de execução da junta de referência. Todas as extremidades da ligação entre os termopares e os cabos de medição foram compactadas e envolvidas por uma fina camada de lã de pet (Figura 19a). Esta junção foi inserida num tubo metálico e este foi novamente envolto em isolante lã de pet (Figura 19b). Por fim, todo o conjunto foi inserido num tubo de PVC (Figura 19c). Esse procedimento foi realizado com o objetivo de manter uniformidade de

temperatura entre as junções dos termopares e o termistor de medição da junta de referência.

Figura 19: Etapas de execução da junta de referência



### b) Sensores de Fluxo de Calor

O fluxo de calor nas coberturas foi medido por transdutores de fluxo de calor a gradiente tangencial com dimensões de 10 x 10 cm, conforme mostrado na Figura 20 (GÜTHS et al., 1995) posicionados na região central da laje ou forro de PVC (Figura 21). Os transdutores foram calibrados com o auxílio de uma resistência aquecedora planar de mesma dimensão, cujos resultados são apresentados no Apêndice II.

Em apenas uma das coberturas instalou-se três transdutores de fluxo de calor no sentido do caimento da telha, posicionados conforme a ilustração da Figura 22: Distribuição dos transdutores de fluxo de calor em planta baixa e da Figura 23 com o objetivo de verificar a distribuição do fluxo de calor no ático da cobertura.

Figura 20: Transdutor de fluxo de calor



Figura 21: Região central da laje/forro



Figura 22: Distribuição dos transdutores de fluxo de calor em planta baixa

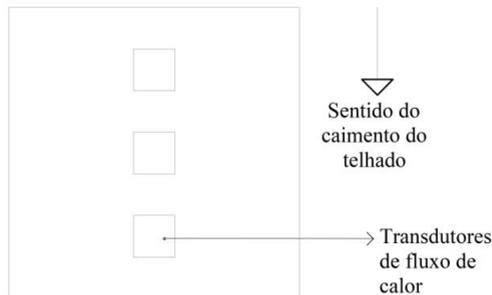
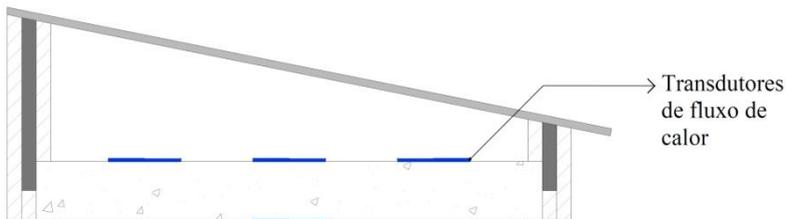


Figura 23: Distribuição dos transdutores de fluxo de calor em corte



Outras variáveis como radiação global média, umidade relativa, índice pluviométrico foram obtidas através da estação meteorológica do Laboratório de Energia Solar (Labsolar) da UFSC, distante aproximadamente 50 metros da bancada experimental.

### 3.1.2 Configurações das coberturas estudadas

As medições na bancada experimental foram divididas em duas etapas, chamadas de Estudo 1 e Estudo 2. No Estudo 1, todas as coberturas apresentaram laje de concreto como o material que separa o espaço interno da bancada e o espaço do ático. No Estudo 2, houve a substituição da laje de concreto por forro de PVC em seis das oito coberturas estudadas.

Para cada etapa foram realizados três grupos de medições, a primeira referente a aferição, a segunda referente as medições durante um período quente e a última relativa a medições durante um período de temperaturas amenas.

### 3.1.2.1 Estudo 1: Coberturas com Laje de concreto

Nesta etapa foram utilizadas telhas de fibrocimento como revestimento externo de telhados e foram realizados três grupos de medições, que foram: medições de aferição, medições de verão e de inverno.

Nos ensaios de aferição todas as coberturas apresentaram a mesma configuração, ou seja, laje de concreto, espaço do ático e telha de fibrocimento. A cobertura 2 apresentou telha de fibrocimento branca não participou das medições de aferição, uma vez que essa característica altera as temperaturas superficiais e o fluxo de calor que atravessa o sistema.

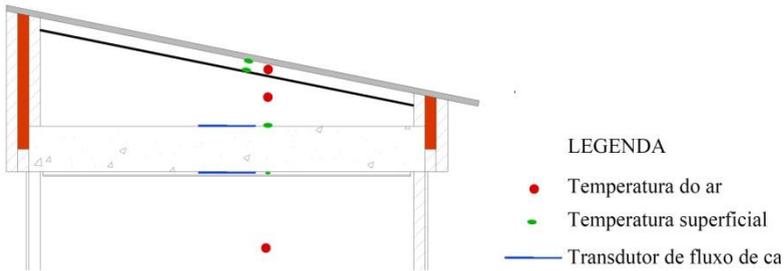
Nas medições para o verão e para o inverno utilizou-se as coberturas de 1 a 4 e a configuração das coberturas está indicada no Quadro 1.

Quadro 1: Configuração das coberturas: Estudo 1

Cobertura	Legenda	Símbolo	Configuração do sistema de cobertura
1	REF		Laje de concreto + câmara de ar + telha de fibrocimento ( $\alpha=0,5$ )
2	BRC		Laje de concreto + câmara de ar + telha de fibrocimento ( $\alpha=0,2$ )
3	BR ↓		Laje de concreto + câmara de ar + barreira radiante (alumínio para baixo) + telha de fibrocimento ( $\alpha=0,5$ )
4	BR ↑		Laje de concreto + câmara de ar + barreira radiante (alumínio para cima) + telha de fibrocimento ( $\alpha=0,5$ )

A Figura 24 mostra a posição dos sensores de medição de temperaturas e de fluxo de calor. A temperatura do ar foi medida dentro da cavidade interna da bancada de teste, e ático e, especificamente nas coberturas 3 (BR↓) e 4 (BR↑) no espaço de ar entre a barreira radiante e a telha. Para medir temperaturas superficiais, os termopares foram fixados com resina epóxi na face inferior das telhas, e nas faces superior e inferior da laje de concreto. Os transdutores de fluxo de calor foram fixados na parte superior e inferior da laje de concreto.

Figura 24: Localização dos sensores das coberturas 3 e 4 (barreira radiante)

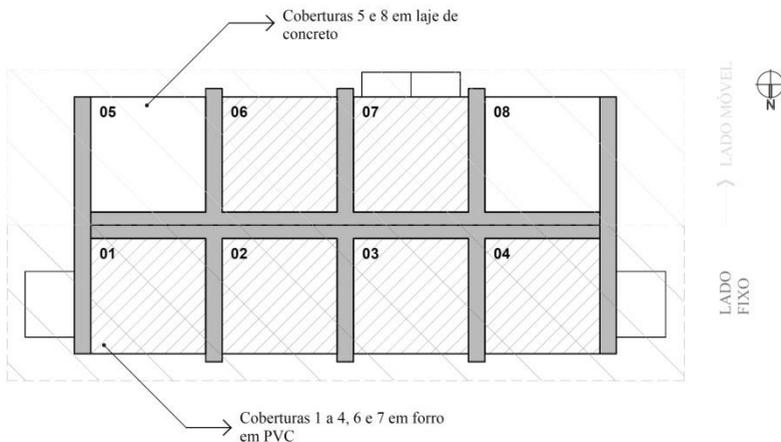


### 3.1.2.2 Estudo 2: Medições com forro de PVC e laje de concreto

Para a realização da segunda etapa de ensaios, a metodologia aplicada no Estudo 1 foi mantida, porém foram realizadas algumas alterações no sistema construtivo e na posição de alguns sensores.

Nesta etapa todas as coberturas participaram do estudo, e então se avaliou 08 sistemas de cobertura, sendo que duas permaneceram com as lajes de concreto (coberturas 5 e 8) e nas outras seis coberturas foi empregado o PVC como forro (coberturas 1, 2, 3, 4, 6 e 7), cuja distribuição na bancada experimental está mostrada na Figura 25.

Figura 25: Planta baixa - posição das coberturas com forro de PVC e das coberturas com lajes de concreto



A etapa de calibração foi dividida em calibração das coberturas com forro de PVC rígido e calibração das coberturas com laje de concreto,

as quais não ocorreram simultaneamente porque houve problema com o transdutor da cobertura 5. Após esta etapa, cada cobertura recebeu a devida configuração, mostrada no Quadro 2. Nas coberturas 2, 3 e 4 foram analisados o efeito de coberturas de alta refletância solar, o uso de isolamento térmico reflexivo e condutivo, respectivamente.

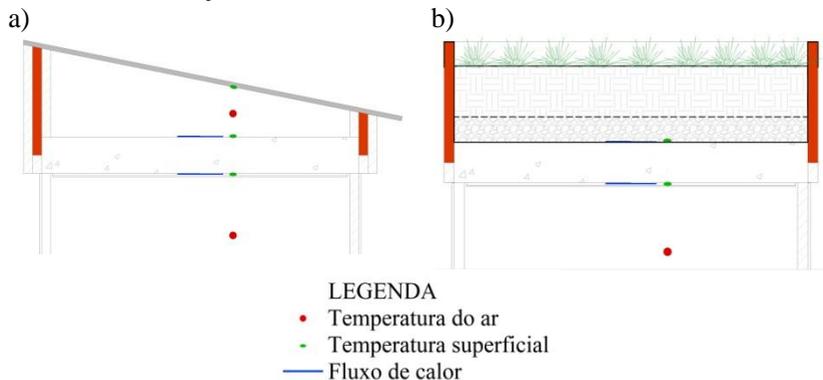
Com o objetivo de avaliar o efeito da umidade no desempenho térmico de coberturas, duas receberam telhas cerâmicas, sendo uma natural, porosa (cobertura 7) e a outra com uma resina impermeabilizante, cujo “I” apresentado como símbolo dentro do desenho da cobertura 6 faz referência a esta impermeabilização. A resina foi escolhida de forma que não alterasse a refletância solar da telha em relação a telha porosa (Apêndice 3). Por fim, construiu-se uma cobertura verde (cobertura 5), que foi comparada com a cobertura de telhas de fibrocimento e laje de concreto (cobertura 8).

Quadro 2: Descrição das coberturas: Estudo 2

Cobertura	Legenda	Símbolo	Configuração do sistema de cobertura
1	REF		PVC + câmara de ar + telha de fibrocimento ( $\alpha=0,7$ )
2	BRC		PVC + camada de ar + telha de fibrocimento branca ( $\alpha=0,2$ )
3	BR ↓		PVC + câmara de ar + barreira radiante + camada de ar + telha de fibrocimento ( $\alpha=0,7$ )
4	EPS		PVC + EPS + camada de ar + telha de fibrocimento ( $\alpha=0,7$ )
5	VEG		Laje de concreto + lona impermeabilizante + argila expandida (espessura de 5 cm) + manta bidim + terra (espessura de 10 cm) + vegetação
6	IMP		PVC + camada de ar + telha cerâmica esmaltada ( $\alpha=0,54$ )
7	POR		PVC + camada de ar + telha cerâmica porosa ( $\alpha=0,52$ )
8	CONC		Laje de concreto + câmara de ar + telha de fibrocimento cinza ( $\alpha=0,7$ )

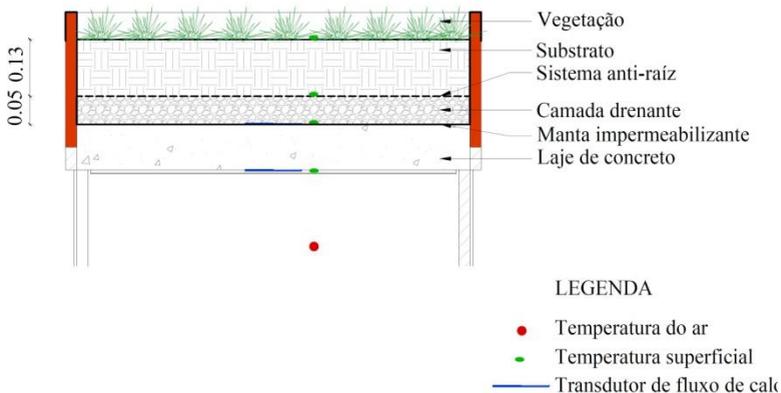
As posições dos sensores nas coberturas sem isolamento (Figura 26 a) e com isolamento reflexivo foram mantidas idênticas ao do estudo anterior, porém com o telhado verde (VEG) as posições dos termopares sofreram alterações, conforme ilustrado na Figura 26 b. Instalou-se um sensor de temperatura a cada camada do telhado verde (figura 27).

Figura 26: Posicionamento dos sensores nas coberturas com isolamento convencional e teto jardim



O telhado jardim (VEG) foi construído sobre uma laje de concreto e recebeu as seguintes camadas: manta impermeabilizante, 0,05 m de camada drenante (composta por argila expandida), manta do tipo “bidim”, 0,13 m substrato e camada vegetal (grama esmeralda), conforme a Figura 27.

Figura 27: Camadas da cobertura jardim



### 3.1.3 Medição da emissividade, absortância solar e quantificação da umidade absorvida pelas telhas cerâmicas

A emissividade dos isolamentos reflexivos foi medida pelo equipamento emissômetro modelo AE1 (Device & Services Co.). Foi medida a emissividade das duas superfícies do isolamento térmico (um lado é aluminizado e o outro é formado por uma película plástica branca).

Como um dos objetivos do trabalho é estudar a influência da absorção de umidade nas telhas cerâmicas no desempenho térmico, uma das coberturas foi coberta por telhas porosas e outra por telhas impermeabilizadas. Entretanto o impermeabilizante não poderia alterar a absortância solar das telhas. Dessa forma a refletância solar foi medida pelo refletômetro solar, modelo (Device & Services Co.) nas duas condições. Dentre os diferentes testes, a resina impermeabilizante multiuso Acqua Incolor Hydronorth foi a que apresentou a menor influência na absortância solar (Apêndice 3).

Para quantificar a água absorvida pelas telhas cerâmicas porosas e impermeáveis desenvolveram-se duas balanças que medem continuamente a massa das mesmas. Cada balança é formada por 4 extensômetros, ligados na forma de uma Ponte de Wheatstone e o sinal amplificados antes de ser medido. Esse sistema foi construído próximo da bancada, exposto aos mesmos condicionantes climáticos da bancada experimental. A Figura 28 mostra de forma esquemática esse sistema e a Figura 29 mostra a imagem do dispositivo. As paredes laterais servem para reduzir a influência do vento.

Figura 28: Modelo esquemático da medição da massa da telha cerâmica

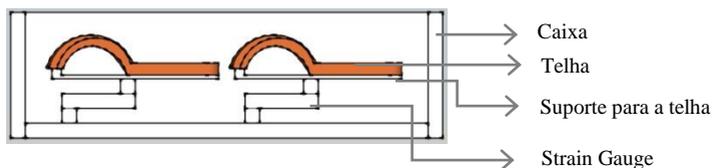


Figura 29: Sistema para medir a massa das telhas



Desenvolveu-se um sistema para detectar a condensação superficial noturna. Dois sensores de umidade do tipo resistivo (Figura 30 e Figura 31) foram instalados sobre uma camada espessa de EPS, com a mesma inclinação das telhas da bancada experimental, conforme a Figura 31. O sensor é formado basicamente por duas trilhas onde é medida a resistência elétrica entre elas. Como o sensor possui trilhas brilhantes, a troca radiante noturna por ondas longas é pouco intensa. Para minimizar esse fato um dos sensores foi instalado sobre uma grande chapa metálica negra (alumínio espessura 4 mm pintado de preto). Dessa forma a troca por onda longa é potencializada e em condições favoráveis haverá condensação sobre todo o aparato.

Figura 30: Sensor de umidade do tipo resistivo



Figura 31: Sistema para detectar a umidade



O segundo sensor é utilizado para medir apenas a presença de umidade advinda da chuva. Para garantir que não ocorra condensação superficial, esse sensor é aquecido por uma resistência planar a aproximadamente 20 °C acima da temperatura do ar.

O que muda entre um sensor e outro é que a presença da água altera a resistência do fio. Portanto, quando houver condensação, apenas o sensor que está localizado sobre a chapa preta terá o valor de resistência do fio alterado. O objetivo de diferenciar a umidade advinda através da condensação ou da chuva é para ter o conhecimento da origem da umidade no interior das telhas cerâmicas porosas e assim, avaliar o efeito apenas da condensação no desempenho térmico de coberturas.

Uma das coberturas com telhas cerâmicas porosas (cobertura 7) foi instrumentada com o sensor de umidade, conforme mostrado na Figura 32. Este sensor foi produzido com fio de cobre estanhado.

Figura 32: Instrumentação de telha cerâmica porosa com sensor de umidade



## 3.2 RESULTADOS PARA A BANCADA EXPERIMENTAL

### 3.2.1 Influência da posição do transdutor de fluxo de calor

Como todos os transdutores de fluxo de calor foram instalados na região central de cada cobertura, verificou-se se o fluxo de calor que atinge a superfície superior do forro é homogêneo ao longo da cobertura (a disposição dos sensores foi mostrado na Figura 22: Distribuição de transdutores de fluxo de calor em planta baixa e Figura 23).

A amostra os resultados para os dias 25 e 26 de janeiro de 2017. A linha chamada de “Cob 1 (centro)” refere-se ao transdutor instalado na região central do forro, a linha “Cob 1 (parte alta)” é relativa ao transdutor instalado no forro correspondendo a parte mais alta do ático e a linha “Cob 1 (parte baixa)” é em relação ao transdutor instalado no forro na parte mais baixa do ático.

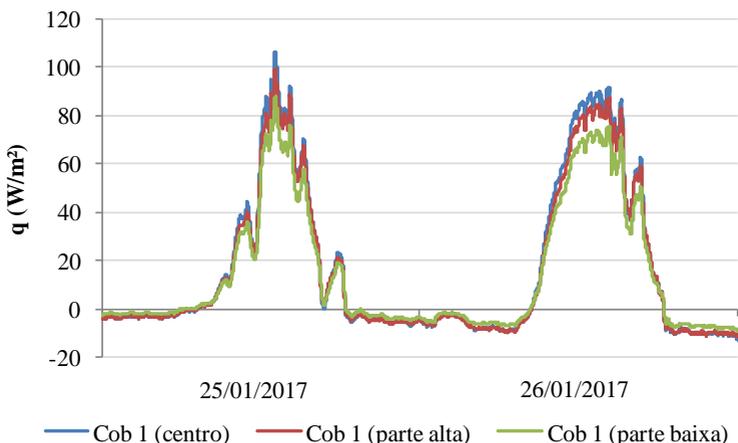
Verificou-se que existe uma pequena diferença no fluxo de calor que atinge a superfície superior do forro. O maior fluxo ocorreu na região

central da cobertura (Cob 1 – central), seguindo pelo fluxo lido na região mais alta do ático (Cob 1 – parte alta), e o menor fluxo de calor ocorreu no transdutor instalado na região mais baixa do ático (Cob 1 – parte baixa).

A diferença do fluxo de calor máximo entre a posição do transdutor central e o localizado na região onde o ático possui maior espessura de ar foi de aproximadamente  $5\text{W/m}^2$ . Entre o transdutor instalado na região central e o transdutor localizado onde há a menor espessura de ar a diferença de fluxo de calor para o horário de pico é de aproximadamente  $15\text{W/m}^2$ .

O fluxo de calor considerado nessa pesquisa foi o do transdutor localizado na região central do forro, e este foi o que apresentou maior fluxo de calor. A causa dessa não homogeneidade do fluxo de calor pode estar relacionado à distribuição de vórtices convectivos ou variação da resistência térmica de contato. Esses transdutores foram removidos duas vezes seguidas para checagem das constantes de calibração. A variação das constantes de calibração foram inferiores a 3%, que é a incerteza estimada das mesmas.

Figura 33: Influência da posição do transdutor de fluxo de calor na cobertura 1



### 3.2.2 Resistência térmica do ático

A resistência térmica no ático foi calculada pela razão do somatório da diferença de temperatura e do somatório do fluxo de calor.

( $R = \sum \Delta T / \sum q$ ). A incerteza ( $u_i$ ) considerada neste valor é do tipo B e ocorreu em função da incerteza de medição do termopar ( $u_i=0,1^\circ\text{C}$ ) e em função da incerteza de medição do transdutor de fluxo de calor, o qual depende da incerteza da constante de calibração (2%) e da incerteza de medição do multímetro (2%). A incerteza total da resistência térmica encontrada é de 2,8%, demonstrado no Apêndice 5.

### 3.2.2.1 Influência do sentido do fluxo de calor na resistência térmica

De acordo com ÇENGEL (2009), INCROPERA e DEWITT, (2008), SABER (2012, 2013a), a resistência térmica para cavidades fechadas e horizontais muda em função do sentido do fluxo de calor. Se o sentido do fluxo de calor é de cima para baixo (descendente) não é necessário calcular o número de Nusselt uma vez que não se formam as correntes de convecção e o fluido mais leve estará sempre acima do fluido mais pesado. Nesse caso considera-se a transferência do calor por condução pura e o Nusselt igual a 1 (INCROPERA E ÇENGEL), de acordo com as equações 19 e 20.

$$q_{\text{conv}} = h_{\text{conv}}(T1 - T2) \quad (19)$$

onde:

$q_{\text{conv}}$  = Fluxo de calor por convecção ( $\text{W}/\text{m}^2$ );

$h_{\text{conv}}$  = Coeficiente de trocas de calor por convecção ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ );

$T1$  e  $T2$  = Temperatura das superfícies ( $^\circ\text{C}$ );

$$h_{\text{conv}} = \frac{Nu * k}{L} \quad (20)$$

onde:

$h_{\text{conv}}$  = Coeficiente de trocas de calor por convecção ( $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ );

$k$  = Condutividade térmica ( $\text{W}/\text{mK}$ );

$L$  = espessura (m)

Se o sentido do fluxo de calor é de baixo para cima (ascendente) o fluido mais pesado estará acima do mais leve, e o fluido mais leve tenderá a subir para a parte superior da cavidade ocasionando o movimento do ar. Quando o número de Rayleigh for maior que 1700 ( $Ra > 1700$ ) considera-se que se iniciam as correntes de convecção natural, chamadas de células de Bénard. (INCROPERA E ÇENGEL).

$$Ra = \frac{g * beta * (T1 - T2) * (L^3)}{(difusiv * viscos)} \quad (21)$$

onde:

$g$  = aceleração gravitacional ( $m/s^2$ );

$beta$  = coeficiente de expansão volumétrica ( $1/K$ );

$(T1 - T2)$  = diferença de temperatura ( $K$ );

$L$  = espessura ( $m$ );

$difusiv$  = difusividade térmica ( $m^2/s$ );

$viscos$  = viscosidade cinemática do fluido ( $m^2/s$ ).

$$Nu = 0,069 * Ra^{1/3} * Pr^{0,074} \quad (22)$$

onde:

$Nu$  = Número de Nusselt;

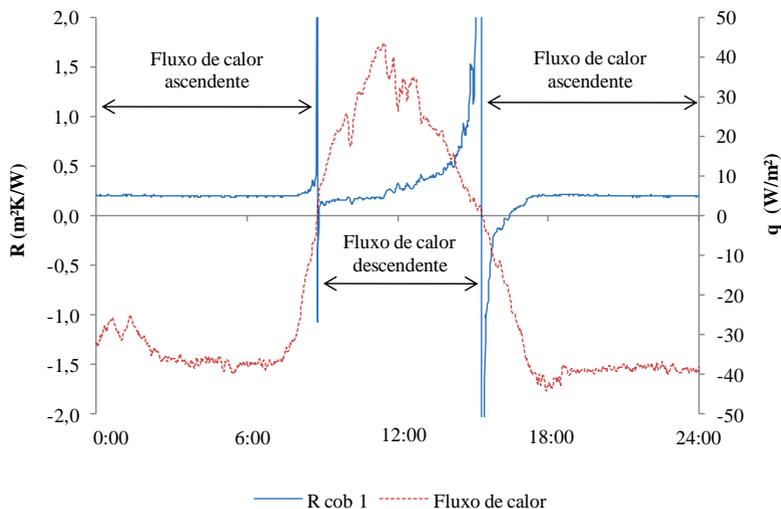
$Ra$  = Número de Rayleigh;

$Pr$  = Número de Prant;

SABER (2012) publicou estudos em que avaliou o efeito da inclinação e da direção do fluxo de calor em cavidades horizontais e fechadas. O autor realizou estudos alterando a inclinação da cavidade em horizontal, inclinada e vertical, onde avaliou a velocidade do ar no interior da cavidade. Para a cavidade horizontal com fluxo de calor descendente constatou que a velocidade do ar foi menor quando comparada com a cavidade com fluxo de calor ascendente. Como resultado, a amostra aquecida na parte superior apresentou a resistência térmica de  $0,67 m^2K/W$  e a aquecida na parte de baixo apresentou a resistência de  $0,43 m^2K/W$ , ambas sem isolamento térmico.

A Figura 34 mostra a resistência térmica e ilustra os sentidos do fluxo de calor para o dia 17 de maio de 2016. Observou-se que para os períodos com fluxo de calor ascendente a resistência térmica tende a permanecer estável e durante o período de fluxo de calor descendente a resistência térmica tendeu a aumentar. Nos horários em que o fluxo de calor foi nulo ou apresentou valores próximos de zero, a resistência térmica apresentou valores subestimados ou superestimados. Desta forma, para o cálculo da resistência térmica, os dados obtidos através da bancada experimental foram separados em fluxo de calor ascendente e descendente.

Figura 34: Resistência térmica para fluxo de calor ascendente e descendente



### 3.2.2.2 Cálculo da resistência térmica por meio da média das medições a cada minuto e através do método sugerido pela ISO 9869

O cálculo da resistência térmica para caracterizar um período, de ganho e perda de calor, pode ser feito de duas formas: o primeiro de acordo com a média das resistências obtidas a cada minuto (Equação 23) e o segundo, realizado pela razão entre o somatório das diferenças de temperatura e o somatório dos fluxos de calor (Equação 24), cujo método é o sugerido pela ISO 9869 (Thermal insulation: Building elements: In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance — Part 1: Heat flow meter method).

$$R_{medio} = \frac{\sum R}{n} \quad (23)$$

onde:

$R_{medio}$  = Resistência térmica obtida através da média das resistências térmicas obtidas a cada minuto ( $m^2K/W$ );

$\sum R$  = Somatório de todos os valores de resistência térmica ( $m^2K/W$ );

$n$  = quantidade de dados.

$$R_{\text{iso}} = \frac{\sum \Delta T}{\sum q} \quad (24)$$

onde:

$\sum \Delta T$  = Somatório de todos os valores diferença de temperatura entre as telhas e o forro ( $^{\circ}\text{C}$ );

$\sum q$  = Somatório de todos os fluxos de calor ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).

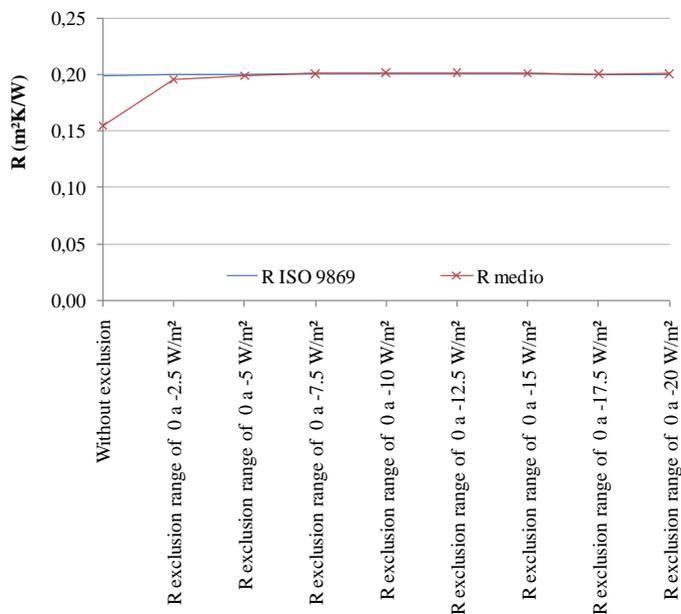
Quando o cálculo da resistência é feito a cada minuto, nos períodos em que os valores de fluxo de calor são muito pequenos e próximos de zero (períodos de transição entre fluxo ascendente e fluxo descendente) o valor da resistência térmica varia significativamente fornecendo resultados super ou subestimados. Uma solução seria excluir do cálculo os valores em que os fluxos eram baixos. Procurou-se, então, verificar até qual faixa de valores deveriam ser excluídos, de forma a não mais interferir no cálculo da resistência térmica.

Calculou-se, então, a resistência térmica através da média das resistências térmicas, sem exclusão de dados e também excluindo dados até chegar ao limite de  $20 \text{ W}/\text{m}^2$ . Esses resultados foram comparados com os obtidos através do método sugerido pela ISO 9869.

A Figura 35 mostra os valores de resistência para progressivas faixas de fluxos excluídos e também o valor calculado pelo método ISO 9869, para o sentido de fluxo ascendente (predominante durante o período avaliado). Quando não houve exclusão de dados a resistência encontrada foi de  $0,16 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ . Com a exclusão dos fluxos de calor até  $2,5 \text{ W}/\text{m}^2$  a resistência foi de  $0,199 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$  e para a exclusão dos dados de fluxos de calor até  $5 \text{ W}/\text{m}^2$  o valor de resistência foi de quase  $0,20 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ . Foi observado que a partir da faixa de exclusão de valores de fluxo de  $7,5 \text{ W}/\text{m}^2$ , os valores de resistência térmica permaneceram estáveis (em torno de  $0,20 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ ) e foram similares aos valores calculados pelo método sugerido pela ISO 9869.

Dado a melhor estabilidade e facilidade de análise, o cálculo da resistência térmica será realizado pelo Método ISO (Equação 24) separando apenas o sentido do fluxo de calor.

Figura 35: Comparação entre os métodos de calcular a resistência térmica



### 3.2.2.3 Repetibilidade dos resultados

A verificação da repetibilidade dos valores obtidos para a resistência térmica foi estudada para uma cobertura, no caso a de referência ou cobertura 1.

A Tabela 2 mostra o cálculo da resistência térmica para um período de quinze dias de medição e como o período selecionado foi em janeiro, consideraram-se dados de fluxo de calor descendentes.

Tabela 2: Resistência térmica para diferentes dias de medição

<b>Data</b>	<b>R por dia (m<sup>2</sup>K/W)</b>	<b>R médio (m<sup>2</sup>K/W)</b>
13/01/2017	0,29	<b>0,28</b>
14/01/2017	0,28	
15/01/2017	0,29	
16/01/2017	0,28	
17/01/2017	0,28	
18/01/2017	0,26	
21/01/2017	0,30	
22/01/2017	0,28	
25/01/2017	0,24	
26/01/2017	0,25	
28/01/2017	0,30	
29/01/2017	0,26	
30/01/2017	0,28	
31/01/2017	0,29	
01/02/2017	0,29	
<b>R período total (m<sup>2</sup>K/W)</b>	<b>0,28</b>	
<b>Desvio padrão</b>	<b>0,02</b>	-
<b>Coefficiente de variação (%)</b>	<b>6,1</b>	-

A resistência térmica obtida para o período total foi de 0,28 m<sup>2</sup>K/W, igual ao valor encontrado para a média das resistências calculadas diariamente. O desvio padrão dos resultados foi de 0,02 e o coeficiente de variação entre as resistências diárias foi de 6,1%.

Para responder a questão sobre quanto tempo de medição é necessário para se obter valores de resistência térmica consideradas estáveis, realizou-se uma análise considerando 28 dias entre os meses de março e abril de 2017. Como o fluxo de calor predominante nesse período foi descendente, as resistências térmicas apresentadas na Figura 36 são para esse sentido.

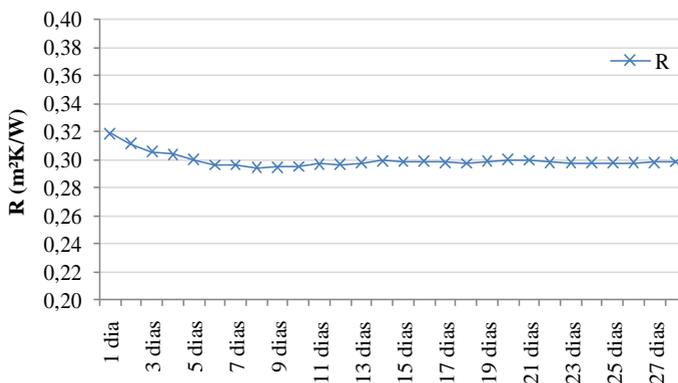
A maior diferença entre as resistências térmicas ocorreu nos primeiros cinco dias de medição, no primeiro dia o valor foi de 0,32 m<sup>2</sup>K/W e no quinto dia foi de 0,30 m<sup>2</sup>K/W. A partir do quinto dia até o nono dia de medição a resistência variou entre 0,29 m<sup>2</sup>K/W e 0,30 m<sup>2</sup>K/W. A partir do décimo dia de medição, os valores de resistência permaneceram em 0,30 m<sup>2</sup>K/W.

Se considerarmos os dados de um dia de medição para o cálculo da resistência térmica, a mesma apresentará erro de 6,8%. Se

considerarmos de dois a quatro dias de medição, encontrou-se erro médio de 3%. Considerando-se de cinco a nove dias de medição, a resistência térmica apresentou um erro de aproximadamente 1% e acima de dez dias de medição, a resistência térmica apresentou um erro de aproximadamente 0,5%.

Ou seja, para os resultados de resistência térmica apresentar maior precisão, é necessário um período de pelo menos dez dias de medição. Quanto maior o período de análise dos dados, maior será a precisão dos resultados.

Figura 36: Resistência térmica de acordo com o período de medição



### 3.2.3 Aferição da bancada experimental

Os itens 3.2.3.1 e 3.2.3.2 mostram a aferição da bancada experimental para os dois estudos realizados, o primeiro em 2016 quando todas as coberturas possuíam lajes de concreto e o segundo, em 2017, quando seis lajes de concreto foram substituídas por forro de PVC e duas coberturas foram mantidas com as lajes de concreto, pois serão avaliadas com cobertura teto jardim.

O objetivo da aferição é mostrar que todas as coberturas envolvidas na pesquisa apresentaram as mesmas condições de temperaturas, fluxos de calor e de resistência térmica.

#### 3.2.3.1 Aferição da bancada experimental: Estudo 1

Visando verificar se a instrumentação estava funcionando adequadamente, todas as coberturas foram construídas idênticas: telha

fibrocimento cinza, sem nenhum isolamento térmico interno e laje de concreto.

A cobertura 2 foi excluída da etapa de aferição por apresentar a cor da superfície das telhas brancas, fato que altera as temperaturas e o fluxo de calor, impedindo a comparação com as demais. As coberturas 5 e 6 também foram excluídas desta etapa da pesquisa por fazerem parte outra investigação que estava acontecendo simultaneamente. Assim, a aferição foi realizada entre as coberturas 1, 3, 4, 7 e 8.

A calibração foi realizada durante o período de 13 a 19 de maio de 2016. Sendo o período dos dias de 12 a 16 com pouca nebulosidade e o período entre 17 a 19 com céu limpo, sem nuvens. A temperatura externa nesses dias variou entre 10,5°C e 25,4°C.

A Figura 37 e a Figura 38 mostram as temperaturas superficiais inferior e superior da laje de concreto. Ao analisar a Figura 37, referente à temperatura da face inferior da laje de concreto observou-se que durante o período diurno as coberturas apresentaram temperaturas similares, porém, no período noturno as coberturas apresentaram temperaturas superficiais diferentes, com uma diferença de até 1,2°C entre a cobertura de maior (cobertura 8) e de menor temperatura (cobertura 3).

Em relação às temperaturas da face superior das lajes de concreto (Figura 38) verificou-se que as mesmas apresentaram resultados similares, tanto para o período diurno quanto noturno.

Figura 37: Temperatura da superfície inferior da laje de concreto

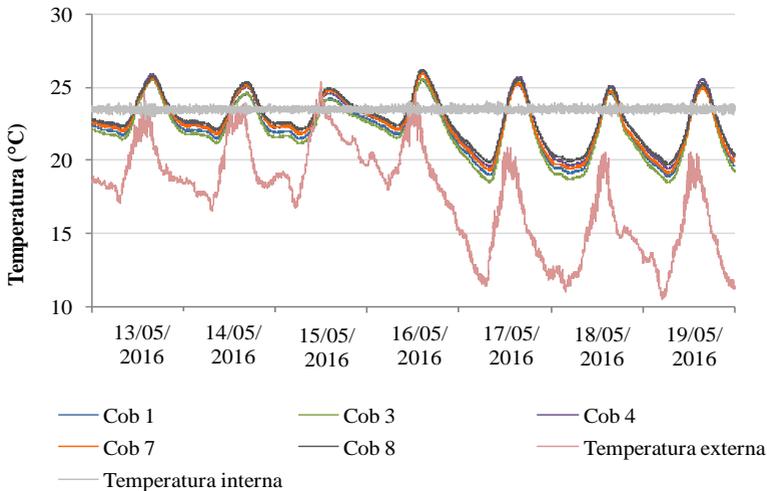
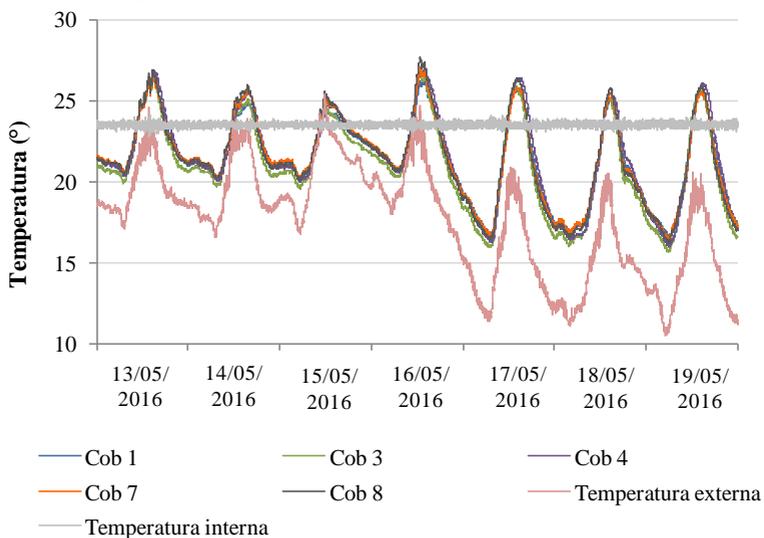


Figura 38: Temperatura da superfície superior da laje de concreto



Em relação às temperaturas do ar no ático (Figura 39) observou-se que os valores obtidos foram similares entre as coberturas, havendo sobreposição das linhas para o período diurno e para o período noturno. As temperaturas do ático variaram entre o valor máximo de 30°C e o valor mínimo de 14°C.

Em relação às temperaturas superficiais das telhas nas cinco coberturas analisadas verificou-se que as mesmas apresentam valores parecidos entre si para o período inteiro, conforme pode ser visualizado na Figura 40. As temperaturas variaram entre 40°C (dia 16 de maio) e 9°C (dia 19 de maio).

Figura 39: Temperatura do ar no ático

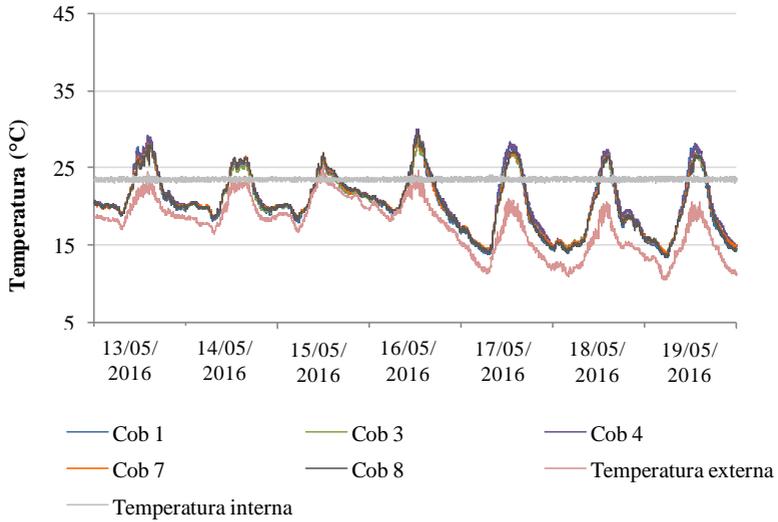
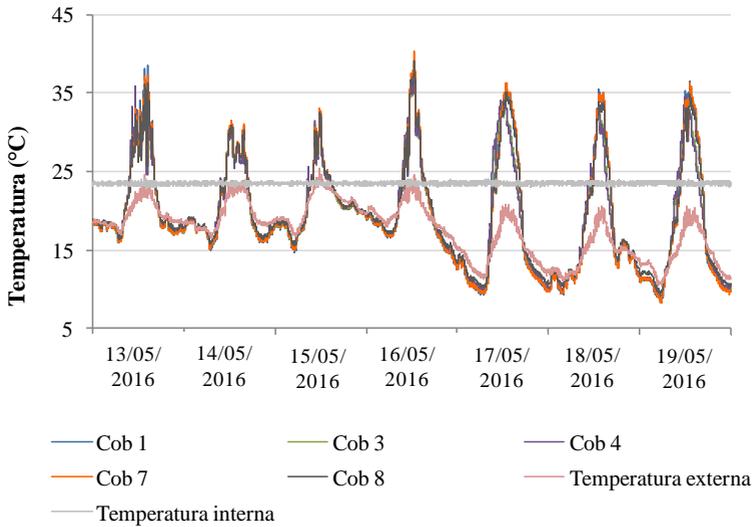


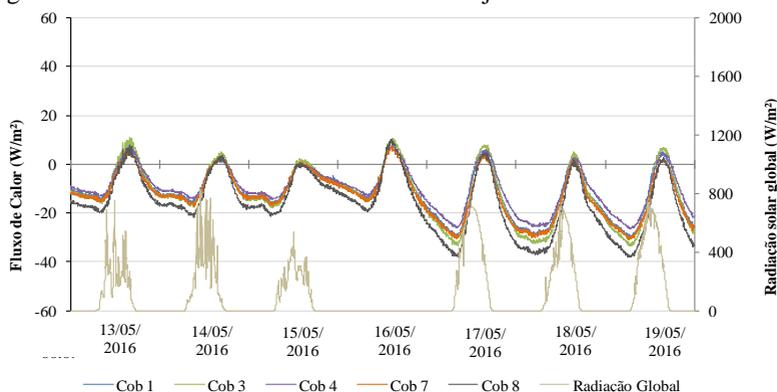
Figura 40: Temperatura superficial das telhas



A medição do fluxo de calor ocorreu na parte inferior e superior da laje de concreto, cujos resultados estão mostrados na Figura 41 e na Figura 42: Fluxo de calor na face superior de concreto respectivamente.

Ao analisar o fluxo de calor na face inferior da laje de concreto observou-se que durante o período diurno as coberturas apresentaram similaridade nos resultados, fato que não ocorreu ao analisar os resultados para o período noturno. Os resultados mostraram grande diferença entre os resultados para o fluxo de calor noturno nas coberturas. A maior diferença está entre as coberturas 4 e 8, que passou de  $10 \text{ W/m}^2$ , conforme visto na Figura 41.

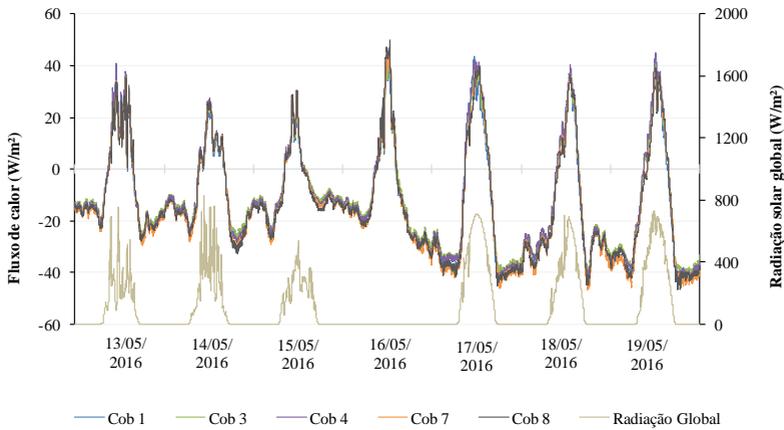
Figura 41: Fluxo de calor na face inferior da laje de concreto



Quando se analisou o fluxo de calor na face superior das lajes de concreto observou-se que as coberturas apresentaram valores com pouca diferença entre elas, evidenciando que estão expostas a condições de medição similares. Dessa forma, para análise do Estudo 1 foram utilizados os valores dos fluxos da face superior.

O motivo para a variação dos valores na face inferior da laje de concreto, tanto em relação às temperaturas das superfícies da laje quanto aos fluxos de calor lidos nessa superfície, provavelmente está associado a infiltração de umidade no interior da laje. Cabe ressaltar que as lajes de concreto foram impermeabilizadas com selante, mas devido a alta porosidade das mesmas, é compreensível que pode ter havido absorção de água líquida proveniente de infiltração em períodos com chuva e ventos fortes.

Figura 42: Fluxo de calor na face superior da laje de concreto



A Tabela 3 traz o resultado obtido de resistência térmica para as coberturas utilizadas nesta etapa da pesquisa calculada para o sentido de fluxo ascendente durante o período de sete dias. As resistências térmicas das coberturas apresentaram valores que variaram de 0,17 m<sup>2</sup>K/W a 0,20 m<sup>2</sup>K/W, com o desvio padrão de 0,013.

As resistências térmicas das coberturas foram comparadas com a cobertura 1, a qual será utilizada como cobertura de referência, e a cobertura que apresentou a maior diferença foi a 8, com uma diferença de 15% nos resultados. As outras apresentaram uma diferença máxima de 5%.

Tabela 3: Resistência térmica total para por cobertura para fluxo ascendente

Coberturas	R (m <sup>2</sup> K/W) - Fluxo ascendente
1	0,20
3	0,19
4	0,20
7	0,19
8	0,17
<b>R médio</b>	<b>0,18</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,013</b>

Em relação a resistência térmica para o sentido de fluxo descendente (Tabela 4), observou-se que a resistência térmica de cada

cobertura aumentou quando comparada com o sentido ascendente, conforme o indicado pela literatura, porém os resultados diferiram mais entre si. Este fato pode ser explicado em função de que o mês de maio apresentou temperaturas amenas e as coberturas apresentam mais perdas do que ganhos térmicos, sendo o sentido de fluxo ascendente predominante neste período.

O período de ganho térmico, que ocorreu aproximadamente das 9 até as 15 horas, provavelmente não foi suficiente para que as coberturas entrassem em equilíbrio térmico, ou seja, os dados de fluxo de calor descendente não foram representativos para caracterizar o período. A resistência térmica total para o período de fluxo descendente foi de 0,26 m<sup>2</sup>K/W e o desvio padrão foi de 0,031, praticamente três vezes maior do que sentido ascendente.

Tabela 4: Resistência térmica por cobertura para fluxo descendente

<b>Coberturas</b>	<b>R (m<sup>2</sup>K/W) - Fluxo descendente</b>
1	0,30
3	0,24
4	0,23
7	0,29
8	0,24
<b>R médio</b>	<b>0,26</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,031</b>

Com base nesses resultados, sugere-se avaliar a resistência térmica para sentido de fluxo predominante do período. Por exemplo, considerou-se o sentido de fluxo ascendente os períodos de temperaturas amenas (meses de maio a setembro) e o sentido de fluxo descendente os meses mais quentes do ano (outubro a abril). Desta forma, obtêm-se resultados mais representativos para cada sentido de fluxo de calor, pois os valores de fluxo são maiores, e prevalecem por mais tempo.

### 3.2.3.2 Aferição da bancada experimental: Estudo 2

Nesse estudo 06 lajes de concreto foram substituídas por forro PVC. Duas lajes ainda foram mantidas em concreto, nas quais avaliou-se o desempenho térmico de coberturas verdes. As medições para aferição das coberturas com forro de PVC e com laje de concreto não ocorreram simultaneamente pelo fato do transdutor de fluxo de calor da cobertura 5

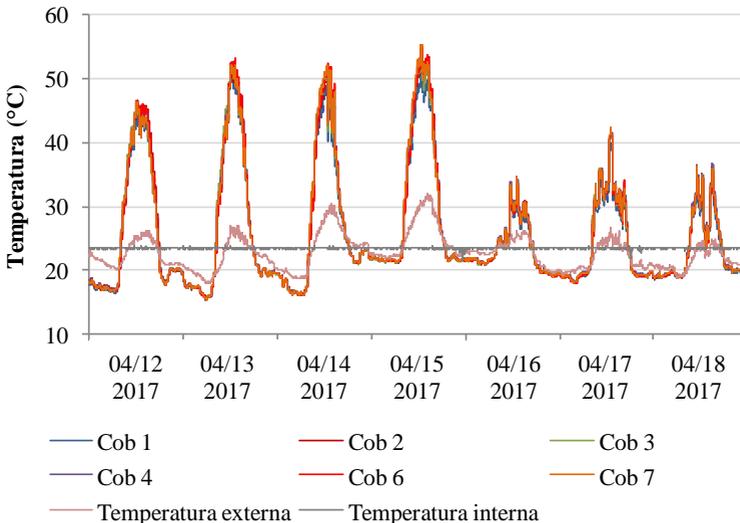
ter apresentado problemas. Corrigido o problema, a mesma foi calibrada juntamente com a cobertura 8, que também possuía laje de concreto.

a) Aferição das coberturas com forro de PVC

Neste item é mostrado a calibração das coberturas 1, 2, 3, 4, 6 e 7, uma vez que todas apresentaram forro de PVC em suas configurações. A Figura 43 mostra a variação da temperatura superficial das telhas nas coberturas para o período de 12 a 18 de abril de 2017, sendo que os dias 12, 13, 14 e 15 foram ensolarados e os dias 16, 17 e 18 foram nublados, com períodos de chuva. Neste intervalo de tempo, a temperatura externa máxima foi 32,1°C e a mínima foi 18°C.

Os valores de temperatura das telhas apresentaram boa concordância entre si, mostrando similaridade nos resultados e sobreposição das linhas. A variação dessa temperatura foi de aproximadamente 15°C até 55°C.

Figura 43: Temperatura superficial das telhas



Ao analisar a temperatura do ar no ático (Figura 44) observou-se que os resultados obtidos entre as coberturas foram semelhantes entre si. A menor temperatura foi de aproximadamente 19°C e a maior foi de aproximadamente 45°C para os dias ensolarados. As temperaturas das faces superiores do forro de PVC estão mostradas na Figura 45:

Temperatura da superfície do PVC e observou-se que as mesmas apresentam congruência dos resultados.

Com base nos resultados obtidos referentes às temperaturas, observou-se que todas as coberturas apresentaram resultados similares entre si, evidenciando que estão expostas às mesmas condições.

Figura 44: Temperatura do ar no ático

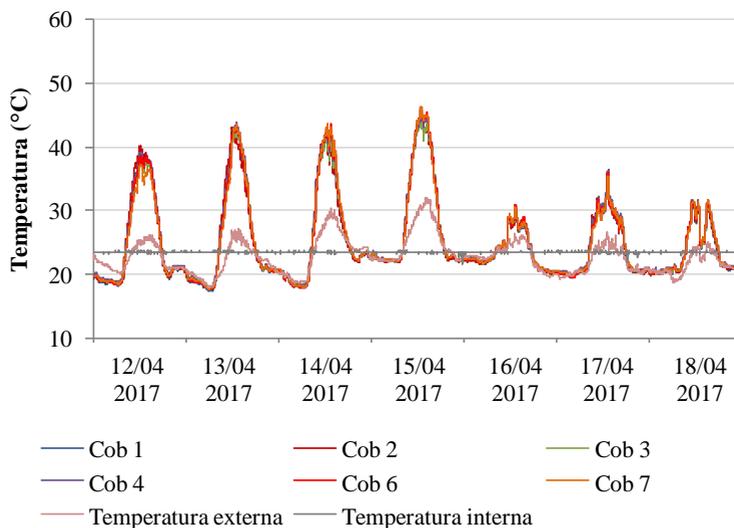
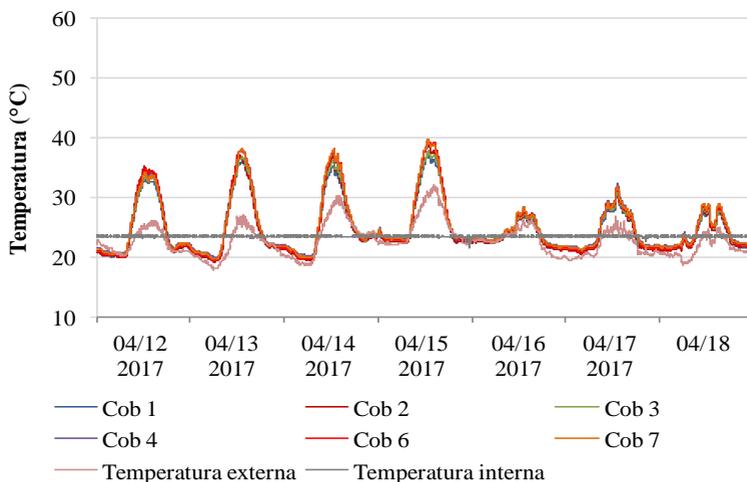
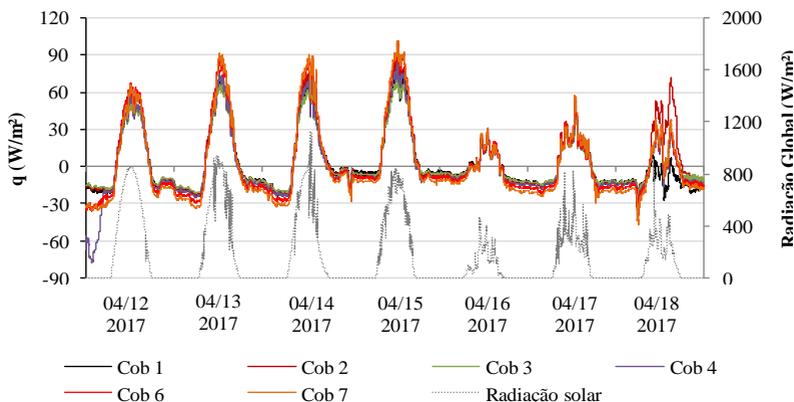


Figura 45: Temperatura da superfície superior do PVC



O fluxo de calor foi medido na face inferior do forro de PVC devido a um problema ocorrido no transdutor superior da cobertura 6. A Figura 46 mostra o fluxo de calor na face inferior do forro de PVC, o qual variou de aproximadamente  $-30 \text{ W/m}^2$  à  $90 \text{ W/m}^2$  para o período analisado. É necessário observar que todas as coberturas apresentaram valores de fluxo de calor parecidos entre si, com diferenças pequenas, evidenciando a similaridade das seções de teste.

Figura 46: Fluxo de calor na face inferior no forro de PVC

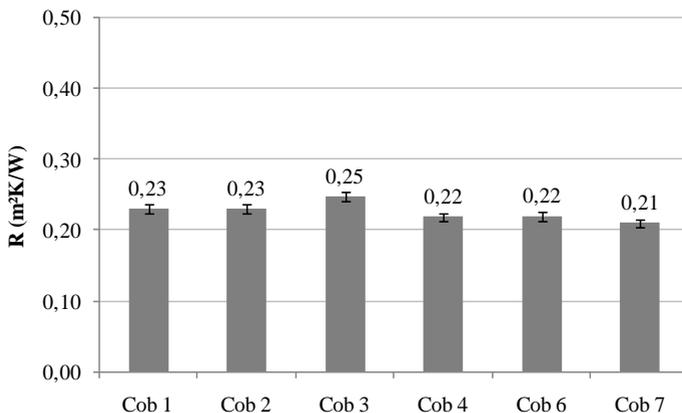


Calculou-se a resistência térmica na cavidade do ático desconsiderando-se a resistência térmica relativa ao forro de PVC ( $R=0,064 \text{ m}^2\text{K/W}$ ), cujo valor foi obtido através de ensaio realizado no condutímetro térmico FOX 304.

A resistência térmica das coberturas foi calculada para o período de 15 dias (de 29 de março a 6 de abril e de 12 a 18 de abril de 2017), para fluxo de calor descendente por ser o sentido predominante do período. A resistência térmica para as coberturas de 1 a 4, 6 e 7 está mostrada na Figura 47 e variou de  $0,21\text{m}^2\text{K/W}$  (cobertura 7) a  $0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$  (cobertura 3).

Considerando-se a resistência térmica de  $0,23 \text{ m}^2\text{K/W}$  como o de referência (cobertura 1), as coberturas 3 e 7 apresentam uma diferença máxima de 8,7% em relação a esse valor. A diferença entre as coberturas e a cobertura de referência é menor que 10%, erro considerado baixo perante as incertezas de um trabalho experimental.

Figura 47: Resistência térmica para as coberturas



#### b) Aferição das coberturas com laje de concreto

Este item refere-se à aferição das coberturas 5 e 8, que apresentam laje de concreto (ao invés do forro de PVC) como o material que separa o espaço entre o ático e a câmara interna da bancada. As coberturas 5 e 8 apresentaram a mesma configuração, formadas por telhas de fibrocimento e cavidade do ático.

Os ensaios foram realizados entre 23 de abril e 02 de maio de 2017 e o cálculo da resistência foi feito para fluxo de calor ascendente em função de ser o sentido predominante durante o período. Neste período

houveram dias ensolarados, nublados e períodos de chuva. A temperatura externa apresentou valores mais baixos do que no período anterior, sendo de 12,1°C a 28,8°C.

A Figura 48 mostra a variação da temperatura na face inferior da laje de concreto e foi observado que ambas as coberturas apresentaram valores similares, com amplitude que variou entre 24°C e 25°C, aproximadamente.

A Figura 49 mostra a variação das temperaturas superficiais das telhas (face inferior da telha). As duas coberturas apresentaram valores semelhantes que variou de aproximadamente 8°C até 55°C.

Figura 48: Temperatura superficial inferior da laje (coberturas 5 e 8)

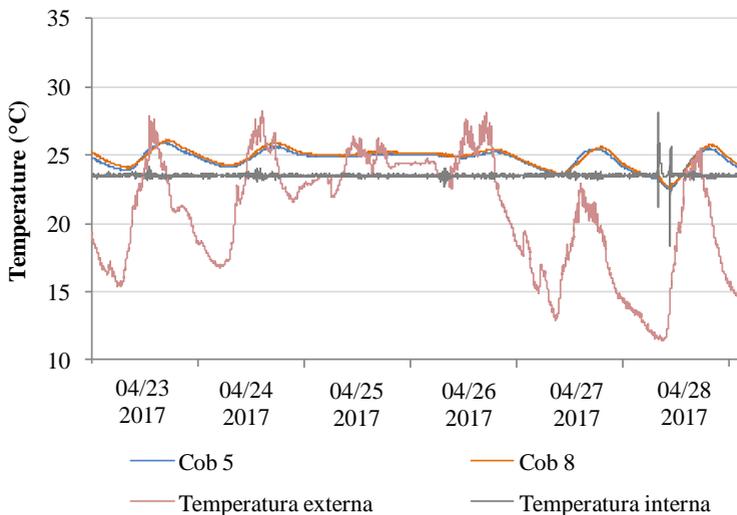
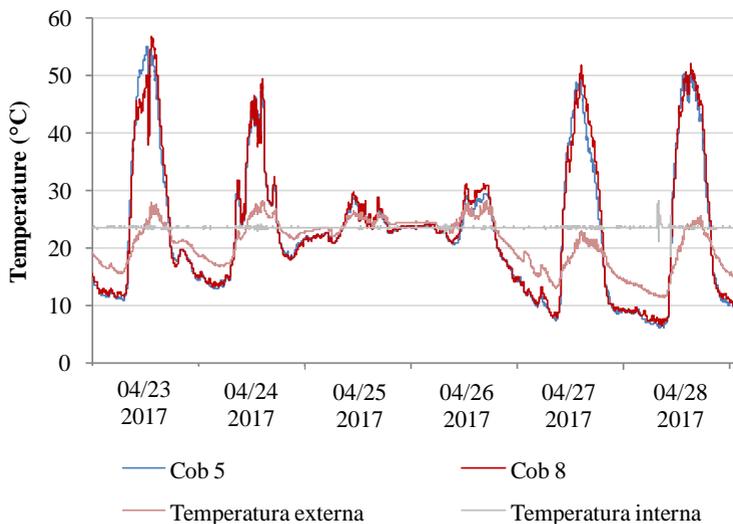
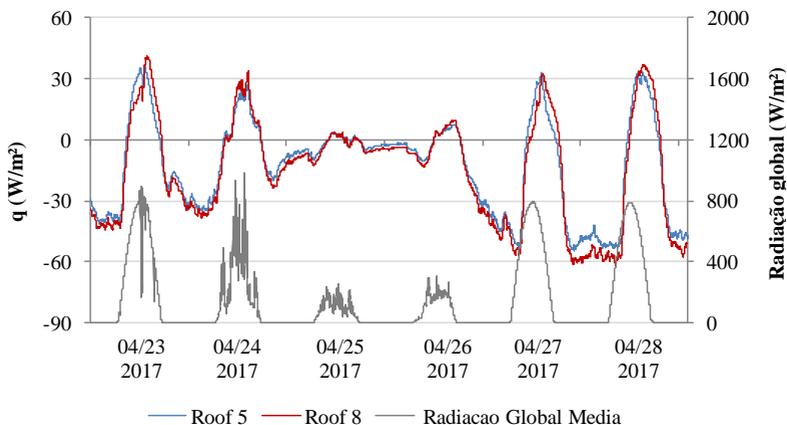


Figura 49: Temperatura superficial das telhas (coberturas 5 e 8)



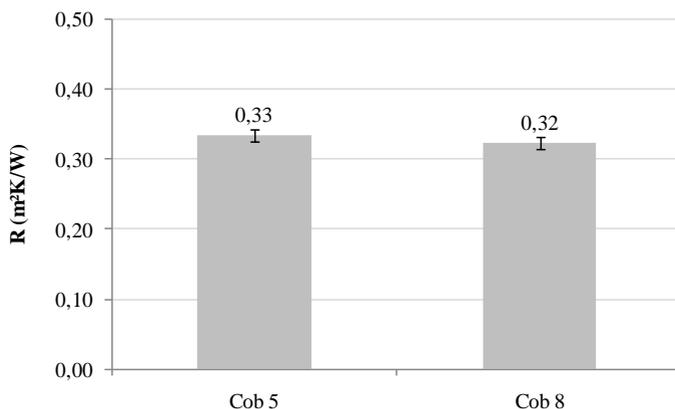
Analisando-se o fluxo de calor nestas coberturas, conforme o Figura 50, percebeu-se que apresentaram o mesmo comportamento, uma vez que os valores de fluxo de calor foram parecidos e variou a aproximadamente  $-60 \text{ W/m}^2$  a  $40 \text{ W/m}^2$ .

Figura 50: Fluxo de calor na face superior da laje de concreto



A resistência térmica foi calculada para o período de 23/04/2017 à 02/05/2017, contabilizando um total de 10 dias. O sentido do fluxo de calor ascendente é o que representa melhor o período, portanto a resistência térmica mostrada na Figura 51 é para esse sentido de fluxo de calor. A resistência térmica para a cobertura 5 foi de 0,33 m<sup>2</sup>K/W e para a cobertura 8 foi de 0,32 m<sup>2</sup>K/W, mostrando boa congruência entre os resultados.

Figura 51: Resistência térmica para as coberturas 5 e 8



### 3.2.4 Análise de coberturas com laje de concreto: Estudo 1:

Aqui são mostrados os resultados do primeiro estudo realizado na bancada experimental em 2016, no qual lajes de concreto com espessura de 8 cm foram utilizadas como o teto do ambiente interno da bancada experimental. Primeiramente serão mostrados os resultados para o período de temperaturas altas (quente) e na seqüência os resultados para o período de temperaturas amenas.

#### 3.2.4.1 Resultados para o período de temperaturas altas

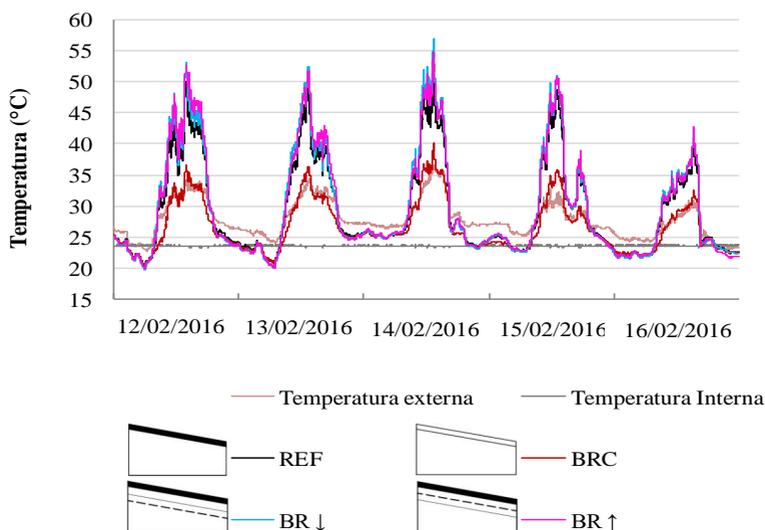
As medições para o período de temperaturas altas, referentes ao verão, foram realizadas entre 12 e 16 de fevereiro de 2016. Durante os dias 12 a 15 o tempo foi com sol entre nuvens e no dia 16 houve a presença de muita nebulosidade. A temperatura externa variou entre 22,9°C e 36,6°C.

As coberturas utilizadas nesta etapa da pesquisa foram a de 1 a 4, sendo a cobertura 1 a utilizada como referência, com telhas fibrocimento cinza (REF), a 2 com telhas de fibrocimento branca (BRC), a 3 com barreira radiante, face aluminizada para baixo (BR↓) e a 4 também com barreira radiante, porém, com a face aluminizada voltada para cima (BR↑).

A Figura 52: mostra as temperaturas superficiais das telhas e do ar externo e interno à bancada experimental no decorrer do período. Para a cobertura de referência (REF) a temperatura superficial da telha chegou próximo dos 47°C nos quatro primeiros dias de medição (dias de maior radiação solar). Ambas as coberturas com barreira radiante, tanto a que apresentou a face aluminizada voltada para baixo (BR↓) quanto a com a face aluminizada voltada para cima (BR↑), apresentaram aumento na temperatura das telhas em relação a de referência, em aproximadamente 2°C. Esse resultado é esperado, dado que há uma menor troca de calor para o interior da edificação, e conseqüentemente ocorre um aumento da temperatura da telha.

Ao analisarmos a cobertura com telhas brancas (BRC), observamos que a temperatura superficial da telha diminuiu em mais de 10°C no horário de pico em relação a cobertura de referência, evidenciando a influência da baixa absorvância e alta refletância solar.

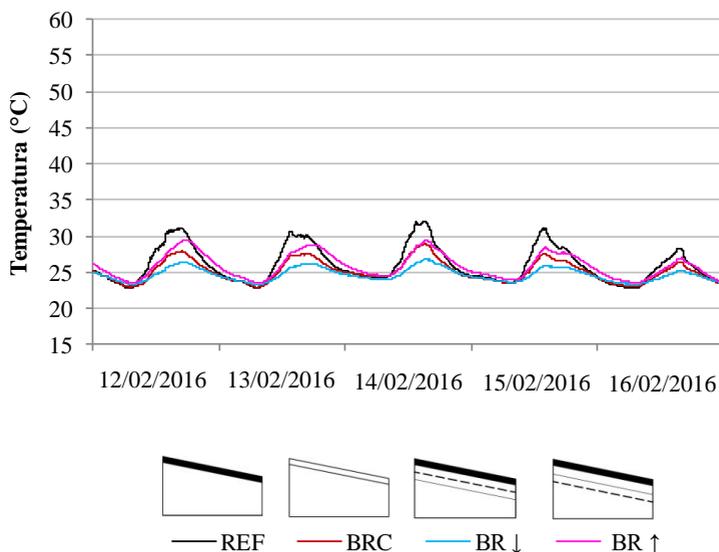
Figura 52: Temperatura superficial da telha



As temperaturas superficiais das lajes de concreto são mostradas na Figura 53. Ao longo dos dias a cobertura de referência (REF) apresentou a temperatura de 30°C para o horário de pico, a cobertura com telha de fibrocimento branca (BRC) apresentou uma redução de aproximadamente 2,5°C em relação a de referência (REF).

As coberturas com barreira radiante apresentaram diferentes temperaturas para a face superior da laje de concreto, enquanto que a expectativa era que apresentassem valores similares. A cobertura com a barreira radiante voltada para baixo (BR↓) apresentou os melhores resultados, ou seja, foi a que apresentou maior redução destas temperaturas, em torno de 6°C menores do que a de referência para o horário de pico. Já a cobertura com a face aluminizada voltada para cima (BR↑) apresentou valores de temperatura da laje intermediária entre a cobertura de referência (REF) e a cobertura de fibrocimento branca (BRC).

Figura 53: Temperatura da face superior da laje de concreto



A Figura 54 mostra o fluxo de calor na parte superior da laje de concreto para as coberturas. Observou-se que todas as coberturas apresentaram redução no ganho térmico durante o dia em relação a cobertura de referência. O telhado de fibrocimento branco (BRC) reduziu

em aproximadamente pela metade o fluxo de calor, passando de  $40\text{W/m}^2$  (REF) para aproximadamente  $20\text{W/m}^2$ .

Apesar das coberturas 3 (BR↓) e 4 (BR↑) apresentarem a mesma configuração, o comportamento térmico foi diferente uma da outra. A cobertura 3 (BR↓) apresentou maior redução do fluxo de calor do que a cobertura 4 (BR↑). Durante o horário de pico houve a passagem de  $10\text{W/m}^2$  na cobertura com a face aluminizada voltada para baixo e (BR↓), enquanto que na cobertura com a face voltada para cima (BR↑) esse valor foi de aproximadamente  $20\text{W/m}^2$ .

Após o término das medições para este período, o isolamento por reflexão foi removido das coberturas e constatou-se que a cobertura com a face aluminizada voltada para cima (BR↑) apresentou oxidação da superfície (Figura 55). A emitância térmica das superfícies foi medida, cujo resultado está mostrado na Tabela 5.

Figura 54: Fluxo de calor para o período de temperaturas altas

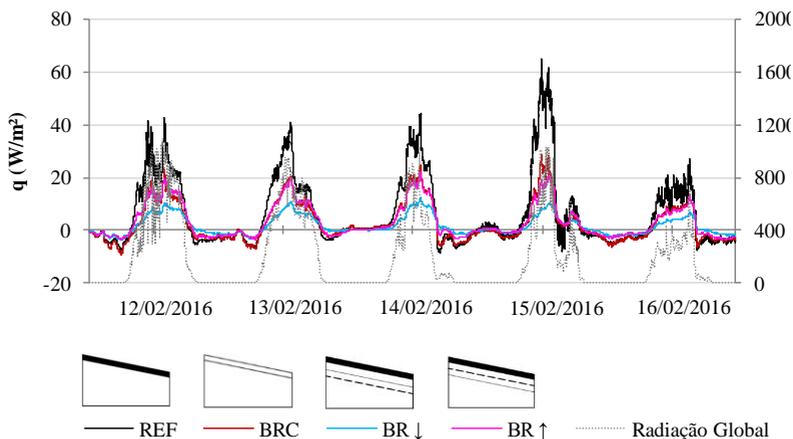
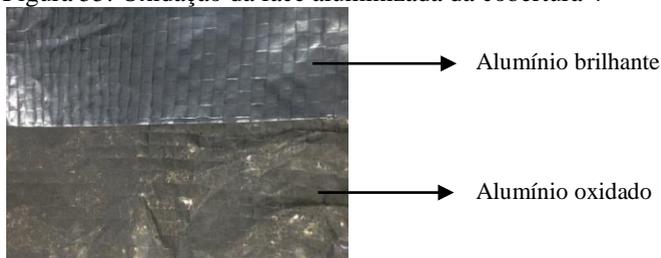


Figura 55: Oxidação da face aluminizada da cobertura 4



As emitâncias térmicas de ambas as barreiras radiantes aumentaram quando comparadas com a emissividade do material novo, cuja emissividade foi de 0,06. Quando o alumínio foi utilizado com a face brilhante para baixo (BR↓) o valor medido aumentou 0,05 e quando essa face foi utilizada para cima (BR↑), a emitância térmica apresentou um acréscimo de 0,64.

O intervalo de tempo entre a instalação dos isolamentos por reflexão e a remoção foi de seis meses. Esse fato reforça a indicação de utilizar esse material com a face de alumínio voltada para baixo.

Tabela 5: Emitância térmica das barreiras radiantes das coberturas 3 e 4

	Barreira radiante nova	BR ↓	BR ↑
Emissividade	0,06	0,11	0,70

A resistência térmica para as coberturas foi calculada por dia e está apresentada na Tabela 6 e a resistência térmica total para caracterizar o período referente ao verão, com sentido de fluxo de calor descendente está apresentada na Figura 56.

A resistência térmica calculada por dia e por cobertura apresentou uma pequena variação nos dias analisadas. O desvio padrão foi pequeno, variando de 0,029 (BR↑) a 0,063 (REF).

Tabela 6: Resistência térmica por dia – verão (fluxo descendente)

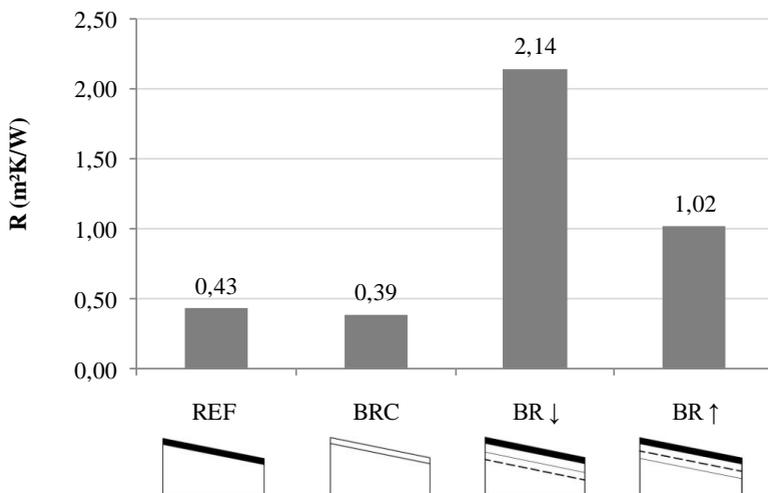
dia	Resistência térmica (m <sup>2</sup> K/W) – Fluxo descendente			
	REF	BRC	BR ↓	BR ↑
12/02/2016	0,45	0,40	2,17	1,04
13/02/2016	0,48	0,39	2,11	1,04
14/02/2016	0,46	0,43	2,10	1,01
15/02/2016	0,30	0,33	2,18	0,97
16/02/2016	0,48	0,42	2,19	1,03
<b>R período total</b>	0,43	0,39	2,14	1,02
<b>Desvio Padrão</b>	0,063	0,040	0,040	0,029

Ao analisar a resistência térmica total para o período de clima quente, verificou-se que as coberturas de referência (REF) e a com telha branca (BRC) apresentam resultados similares, em função de apresentarem a configuração da cobertura formada por apenas uma camada de ar, sendo de 0,43 m<sup>2</sup>K/W e de 0,39 m<sup>2</sup>K/W, respectivamente.

O efeito da oxidação da superfície aluminizada do isolamento por reflexão foi percebida na resistência térmica do ático. Enquanto que a

cobertura 3 (BR↓) apresentou a resistência de 2,14 m<sup>2</sup>K/W a cobertura 4 (BR↑) apresentou o valor de 1,02 m<sup>2</sup>K/W.

Figura 56: Resistência térmica – Fluxo descendente



#### 3.2.4.2 Resultados para o período de temperaturas amenas

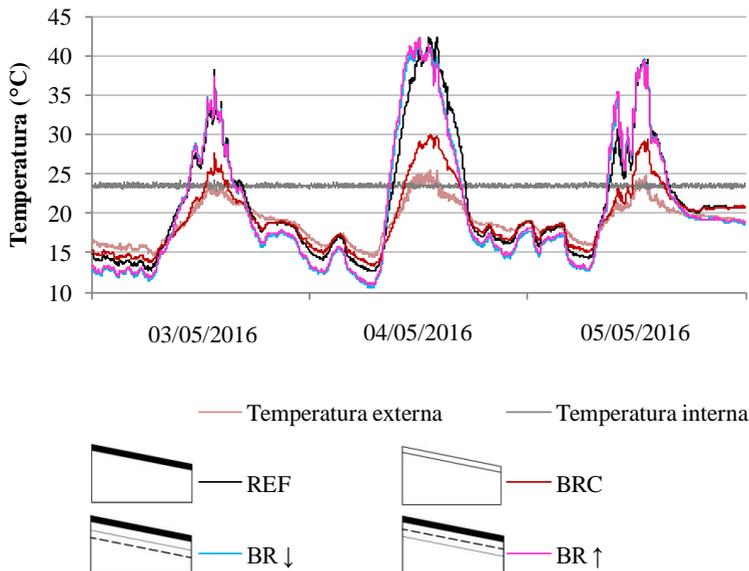
Os dados para o período de temperaturas amenas foram coletados durante os dias 03 a 05 de maio de 2016, os quais foram predominantemente ensolarados e a temperatura externa variou entre 14,4°C e 25,2°C. Nesses dias, em poucos momentos a temperatura externa foi superior em relação à interna, mantida em 23,5°C. Na maior parte do tempo as temperaturas superficiais e do ar no ático apresentaram valores inferiores do que a temperatura interna da bancada.

Devido à oxidação da barreira radiante verificada na análise para o período de temperaturas elevadas, a mesma foi substituída por um material novo nas coberturas 3 (BR↓) e 4 (BR↑).

A Figura 57 mostra as temperaturas das telhas para todas as coberturas. Diferentemente do que ocorreu no período de temperaturas altas, não houve aumento da temperatura superficial das telhas com o uso do isolamento térmico reflexivo. A temperatura das telhas da cobertura de referência (REF), da cobertura 3 (BR↓) e da cobertura 4 (BR↑) apresentaram as temperaturas muito parecidas, com temperatura máxima

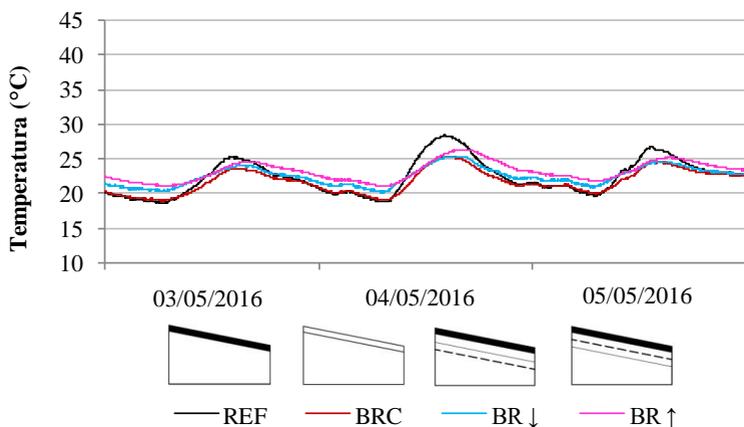
próxima dos 40°C. A cobertura com telha branca (BRC) apresentou redução de aproximadamente 10°C em relação a cobertura de referência (REF).

Figura 57: Temperatura superficial da telha



Ao analisar a temperatura superficial da laje de concreto (Figura 58) observou-se que tanto a cobertura de telhas brancas (BRC) quanto a presença do isolamento térmico reflexivo (BR↓ e BR↑) contribuíram para reduzir a temperatura em relação a cobertura de referência (REF). Observando o dia 04 de maio, verificou-se que as coberturas com barreira radiante (BR↓ e BR↑) apresentaram redução de aproximadamente 2°C, e a cobertura com telhas brancas (BRC) reduziu em aproximadamente 3°C a temperatura superficial da laje de concreto em relação a cobertura de referência, no horário de pico.

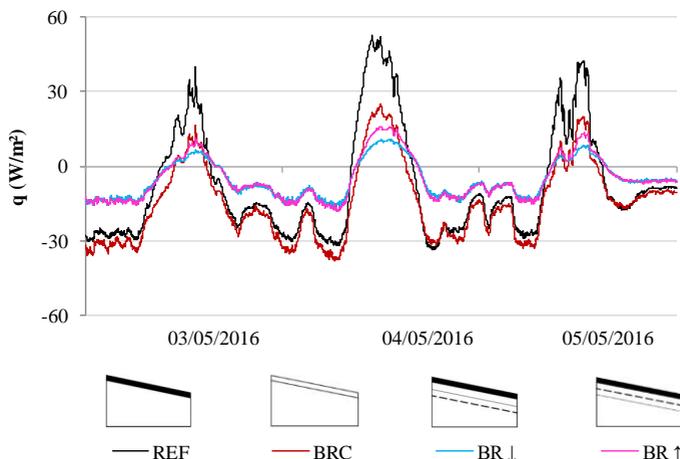
Figura 58: Temperatura superficial da laje



Durante as medições para o período de temperaturas altas descobriu-se que o isolamento reflexivo da cobertura 4 (BR ↑) perdeu sua principal característica devido a oxidação da superfície aluminizada, e substituiu-se o material por um novo. A Figura 59 mostra que o fluxo de calor nas coberturas BR↓ e BR↑ foi similar, e que o uso deste tipo de isolamento reduziu o ganho térmico diurno em até 3 vezes em relação a cobertura de referência (REF), a qual permitiu a passagem de aproximadamente  $40\text{W/m}^2$  enquanto que as coberturas com isolamento reflexivo (BR↓ e BR↑) permitiram a passagem de aproximadamente  $10\text{W/m}^2$ . A cobertura com telhas brancas apresentou boa redução no fluxo de calor para o horário de pico quando comparada com a cobertura de referência (REF), fornecendo resultados similares aos das coberturas com barreiras radiantes.

No período noturno, no qual normalmente ocorrem as perdas térmicas, a presença da barreira radiante reduziu as perdas térmicas em aproximadamente 50%. Já a cobertura 2 (BRC) propiciou uma perda de calor maior, similar ao telhado de referência. Essa é uma característica conhecida das coberturas brancas, que propiciam bom isolamento térmico diurno, e durante a noite propiciam um desejável resfriamento da edificação (para climas quentes).

Figura 59: Fluxo de calor nas coberturas



O cálculo da resistência térmica foi feito por dia e para o período total de medições (sete dias). Nos dias em questão, calculou-se a resistência térmica para fluxo de calor no sentido ascendente, uma vez que neste período as coberturas mais perderam energia do que ganharam. A Tabela 7 esses valores de resistência térmica por cobertura.

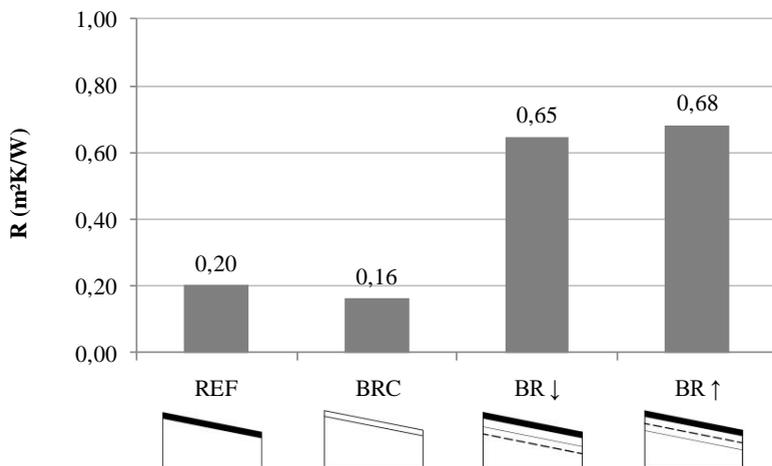
Os valores de resistência por cobertura variaram um pouco em função de que as condições climáticas também variaram, alterando as temperaturas superficiais e o fluxo de calor.

Tabela 7: Resistência térmica por dia para o período de temperaturas amenas – fluxo ascendente

	Resistência térmica ( $m^2K/W$ ) – Fluxo ascendente			
	REF	BRC	BR ↓	BR ↑
03/05/2016	0,206	0,162	0,648	0,691
04/05/2016	0,195	0,157	0,625	0,652
05/05/2016	0,214	0,171	0,672	0,720
06/05/2016	0,246	0,153	0,725	0,771
07/05/2016	0,243	0,161	0,697	0,789
08/05/2016	0,239	0,176	0,678	0,831
09/05/2016	0,237	0,163	0,719	0,802
<b>R período total</b>	0,20	0,16	0,65	0,68
<b>Desvio Padrão</b>	0,020	0,008	0,036	0,065

A Figura 60 mostra a resistência térmica total para todo o período que houve medições. A cobertura de referência (REF) apresentou uma resistência de  $0,20 \text{ m}^2\text{K/W}$  enquanto que a cobertura 3 (BR↓) apresentou a resistência de  $0,65 \text{ m}^2\text{K/W}$  e cobertura 4 (BR↑), apresentou a resistência de  $0,68 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

Figura 60: Resistência térmica – Fluxo de calor ascendente

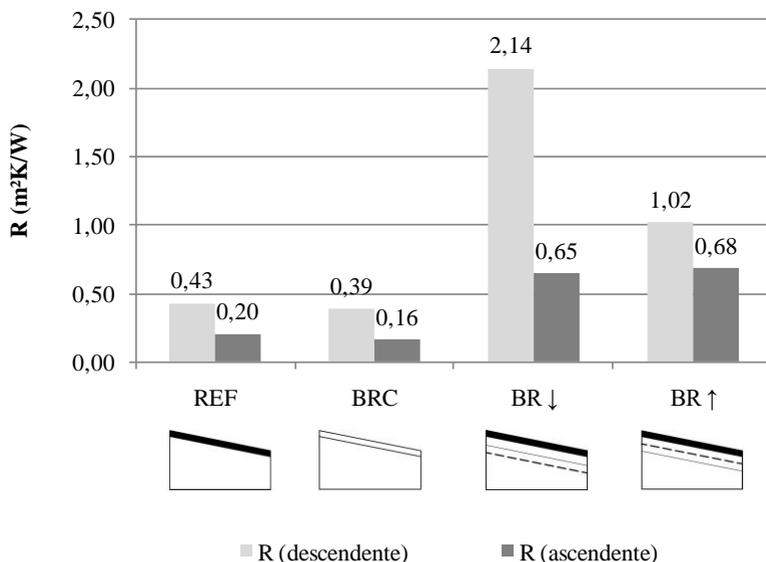


A Figura 61 mostra a comparação entre as resistências térmicas para o sentido de fluxo de calor ascendente e descendente. Percebeu-se de forma clara que com o fluxo descendente a resistência térmica apresentou valores mais altos quando comparado com o sentido ascendente, conforme o esperado.

Durante o verão, o sentido de fluxo de calor predominante é o descendente, e nesse caso, o ar tende a permanecer estagnado na cavidade, apresentando pouca velocidade e considera-se que a transferência de calor é por condução, o que aumenta o valor da resistência térmica. Já para o período de temperaturas amenas, o sentido de fluxo de calor predominante é o ascendente. O ar mais leve (que apresenta maior temperatura) tende a subir e a ocupar o espaço do ar mais denso (com menor temperatura), e este por sua vez ocupa o espaço que anteriormente era do ar mais leve, e assim por diante. Esse fenômeno cria correntes de convecção e provoca o aumento da velocidade do ar no interior da cavidade do ático, o que contribuiu para a redução da resistência térmica da cavidade do ático.

Uma observação importante é em relação às resistências térmicas da cobertura de referência (REF) e da cobertura com telhas brancas (BRC), uma vez que em função de apresentarem a mesma configuração, alterando apenas a refletância solar da superfície da telha, deveriam ter apresentado a mesma resistência térmica. Foi observado que a cobertura com telhas brancas (BRC) sempre apresentou uma resistência térmica menor quando comparado com a cobertura de referência (REF), sendo a diferença para o sentido de fluxo de calor descendente de 10% e para o sentido de fluxo descendente de 20%.

Figura 61: Comparação entre a resistência térmica para fluxo ascendente e descendente



### 3.2.5 Análise de coberturas com forro de PVC e com laje de concreto: Estudo 2

As medições referentes ao Estudo 2 ocorreram de forma contínua ao longo de seis meses (de julho a dezembro de 2017), período correspondente ao final do outono, inverno e início do verão.

Os resultados para estudo foram separados em 3 subitens. No item 3.2.5.1 estão os resultados obtidos para as coberturas com telhas de fibrocimento, no item 3.2.5.2 estão os resultados para as coberturas com

telhas cerâmicas e no item 3.2.5.3 estão os resultados para a cobertura verde.

### 3.2.5.1 Coberturas com forro de PVC e telhas de fibrocimento

a) Comparação entre o uso de isolamento térmico reflexivo, isolamento térmico resistivo e pintura de baixa absorvância solar

✓ Período de temperaturas elevadas

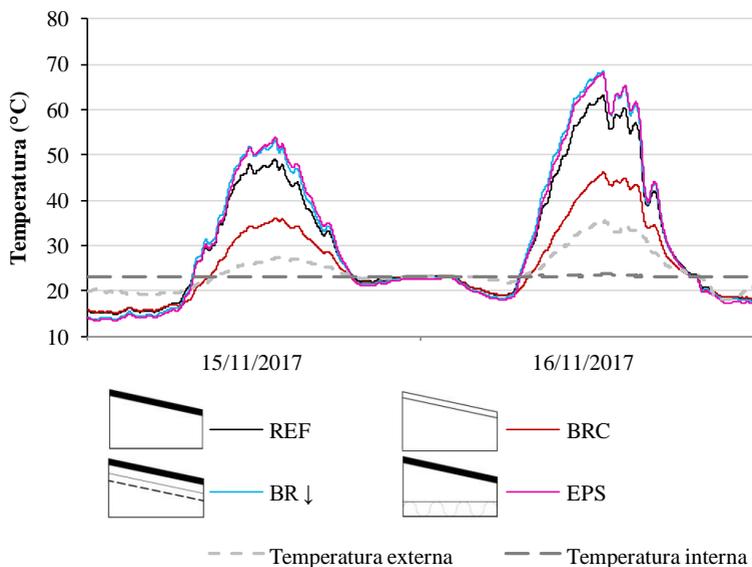
Os dias selecionados para mostrar graficamente o comportamento térmico das coberturas para o período de temperaturas altas foram os dias 15 e 16 de novembro. Os mesmos foram escolhidos em razão do dia 16 de novembro ter apresentado a maior temperatura externa de todo o período analisado (de julho a dezembro de 2017), que chegou a 36,1°C. A temperatura mínima nesses dias foi de 18,1°C e a radiação solar máxima foi de 1170 W/m<sup>2</sup>.

Nesses dias a cobertura de referência (REF) apresentou temperatura máxima das telhas de 63,1°C e a mínima de 14,8°C. Observou-se, conforme previsto, que o uso de material isolante térmico, seja o isolamento por reflexão ou o isolamento por condução aumentou a temperatura superficial das telhas quando comparadas com a cobertura de referência (Figura 62).

Em relação às temperaturas máximas das telhas, observou-se que as telhas da cobertura 3 (BR↓) apresentaram um aumento de 5,3°C e as telhas da cobertura com EPS apresentaram um aumento de 4,9°C em relação à cobertura de referência (REF). Já a cobertura 2 (BRC) apresentou a temperatura máxima das telhas em 46 °C, uma redução em mais de 15°C na temperatura máxima comparada com a cobertura de referência.

Em relação às temperaturas mínimas das telhas, as coberturas com isolamento térmico apresentaram valores mais baixos, sendo de 13,6°C para a cobertura 3 (BR↓) e de 13,4°C na cobertura com EPS (1,2°C e 1,4°C menores do que a cobertura de referência, nesta ordem). Isso ocorreu porque o isolamento reduziu o fluxo de calor vindo da base, fazendo a temperatura das telhas sofrerem uma interferência maior do ambiente externo.

Figura 62: Temperaturas superficiais das telhas



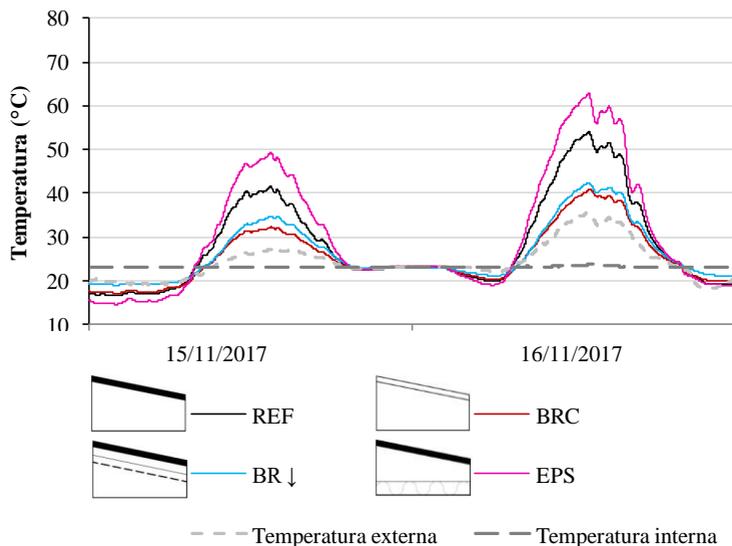
A variação da temperatura do ar no ático pode ser visualizada na Figura 63. As coberturas 2 (BRC) e 3 (BR↓) reduziram a temperatura máxima do ar ático em 13,2 °C e em 11,6°C, respectivamente, enquanto que a cobertura com EPS apresentou essa temperatura 8,7 °C mais elevada do que a cobertura de referência (REF). Tal fato era esperado, dado que o isolamento reduz a transferência de calor para o interior do ático.

A cobertura com telhas brancas (BRC) reduziu a absorção da radiação solar na superfície das telhas e conseqüentemente aqueceu menos o ar no ático. No caso no isolamento com barreira radiante (BR↑), a razão para redução na temperatura do ático está associada em função da posição que o isolamento foi fixado na cobertura, acompanhando a inclinação e sobre as ripas, reduzindo a transferência do calor por radiação vindo da cobertura e sofrendo maior influência do fluxo de calor vindo do interior da bancada, contribuindo para o espaço do ático apresentar menor temperatura.

O isolamento por condução (EPS), assim como evita as trocas térmicas do ático para o ambiente interno da bancada, também evitou o fluxo de calor no sentido contrário, ou seja, a transferência de calor da bancada experimental para o ático foi menor, fazendo que o ático sofresse

menos interferência do ambiente interno da bancada, razão pela qual a temperatura desta cobertura foi maior.

Figura 63: Temperatura do ar no ático



Ao analisar a temperatura superficial dos isolamentos verificou-se que os mesmos apresentaram valores similares entre si, conforme mostra a Tabela 8.

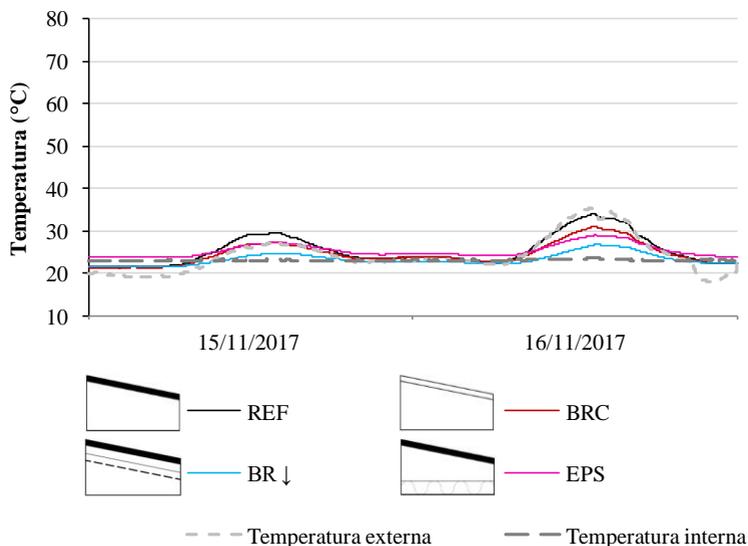
Tabela 8: Temperatura superficial dos isolamentos térmicos

	Isolamento por reflexão	Isolamento por condução
T max (°C)	62,8	61,7
T med (°C)	30,4	30,4
T min (°C)	15,2	15,1

Todas as coberturas apresentaram valores de temperatura diurna para a superfície inferior do forro menor do que a cobertura de referência, conforme mostra a Figura 64.

A cobertura que apresentou maior redução da temperatura superficial do forro foi a cobertura 3 (BR↓), diminuindo em 7,2 °C no horário de pico, quando comparada a cobertura de referência (REF).

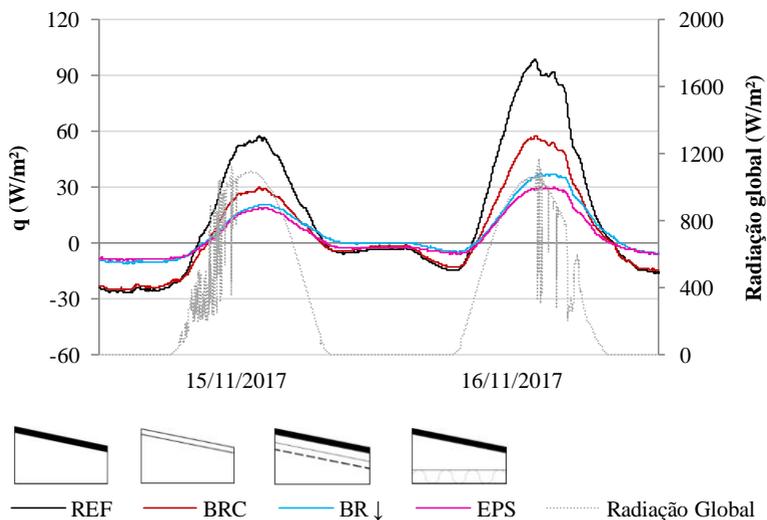
Figura 64: Temperatura da superfície inferior do forro



O fluxo de calor que atinge a superfície inferior do forro de PVC nas quatro coberturas está mostrado na Figura 65. Para o horário de pico, a cobertura com EPS foi que mais reduziu a transferência de calor para o interior, seguida pela cobertura 3 (BR↓) e pela cobertura 2 (BRC). A redução foi de 69% na cobertura com EPS, de 62% na cobertura com barreira radiante (BR↓) e de 42% na cobertura com telhas brancas (BRC).

Ao analisar o fluxo de calor nos horários de perda de calor, percebeu-se que a cobertura com telhas brancas (BRC) tem uma vantagem em relação às coberturas com isolamento térmico, no sentido que ela perde mais calor para o exterior durante o período noturno (fluxo negativo), fato que pode contribuir para a redução na temperatura interna da edificação nos períodos quentes.

Figura 65: Fluxo de calor para os dias 15 e 16 de novembro de 2017

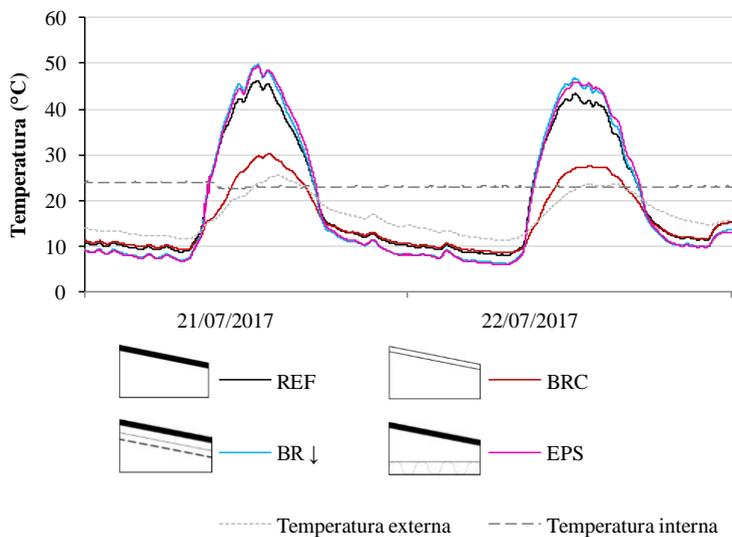


✓ Período de temperaturas amenas

Foram selecionados dois dias para mostrar os resultados para o período de temperaturas amenas. Esses dias, 21 e 22 de julho de 2017, os quais apresentaram as menores temperaturas de todo o período de medição. A temperatura mínima externa foi de 11,3°C, máxima foi de 25,5 °C.

Em relação às temperaturas das telhas (Figura 66), verificou-se que as coberturas com isolamento térmico reflexivo (BR ↓) e com EPS aumentaram em 3,5°C e 3°C no horário de pico em relação a cobertura de referência (REF). Já a cobertura com telhas brancas (BRC) reduziu essa temperatura em 16°C em função da menor absorção solar proporcionada pela cor das telhas.

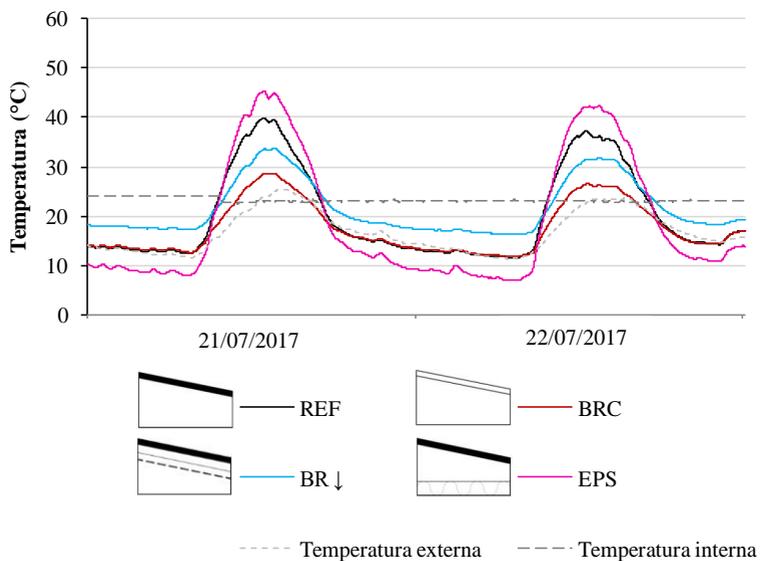
Figura 66: Temperatura superficial das telhas



Observando a temperatura do ar no ático na Figura 67, a cobertura com EPS aumentou a temperatura em  $5,5^{\circ}\text{C}$  no horário de pico e diminuiu  $4,6^{\circ}\text{C}$  a temperatura durante a noite, em relação a cobertura de referência. O isolamento foi instalado horizontalmente sobre o forro de PVC, e reduz as trocas de calor por condução entre o espaço interior da bancada com o ático, assim, a temperatura do ar no ático sofre mais a influência do aquecimento das telhas e da baixa temperatura externa do ar noturna.

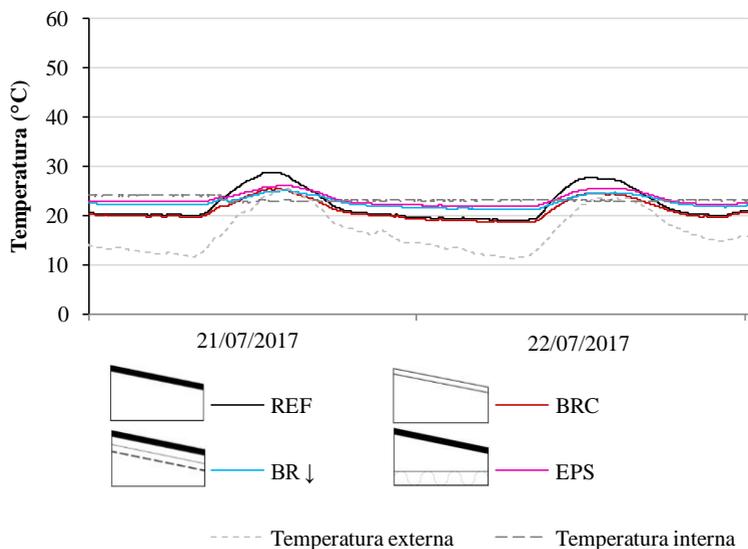
Nota-se que durante a noite a temperatura do ar do ático da cobertura branca (BRC) foi praticamente idêntica à da cobertura de referência (REF). Tal fato era esperado, visto que as emitâncias em ondas longas das duas telhas são idênticas.

Figura 67: Temperatura do ar no ático



A Figura 68 mostra as temperaturas da superfície inferior do forro de PVC. Nota-se que no período noturno (e numa parcela do diurno) elas ficaram abaixo da temperatura interna, devido ao fluxo de calor ascendente nesses períodos. As coberturas isoladas foram as que tiveram a menor oscilação, visto que o fluxo de calor é menor nessas coberturas.

Figura 68: Temperatura da superfície inferior do forro de PVC

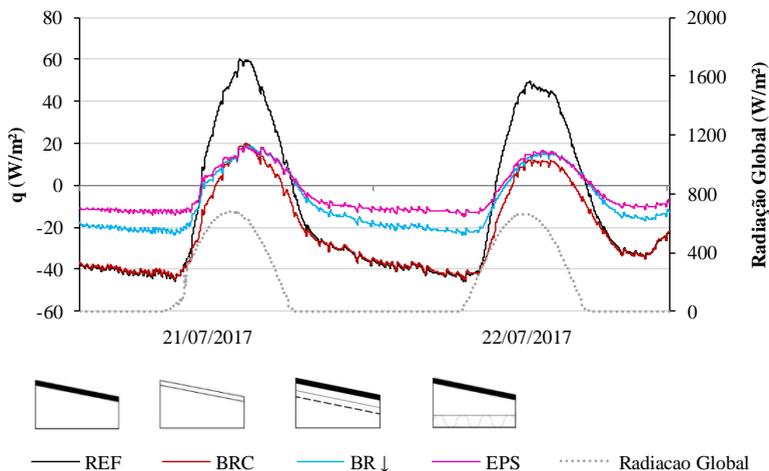


O fluxo de calor no decorrer destes dois dias está mostrado na Figura 69, o qual variou de  $-46 \text{ W/m}^2$  a  $60 \text{ W/m}^2$  na cobertura de referência. É possível verificar que para esses dois dias a maior parte do fluxo é negativa, ou seja, as coberturas mais perdem do que ganham calor.

O fluxo máximo para a cobertura com telhas brancas (BRC), com barreira radiante (BR↓) e com EPS foi similar, conferindo uma redução de aproximadamente 65% (para horário de pico) em relação à cobertura de referência (REF).

Conforme esperado, a cobertura com telhas brancas (BRC) apresentou o desempenho térmico para fluxo de calor negativo similar ao da cobertura de referência, atingindo o valor mínimo de  $-40 \text{ W/m}^2$ . Já a cobertura com barreira radiante reduziu as perdas em  $22 \text{ W/m}^2$  (48%) e a cobertura com EPS reduziu as perdas em  $31 \text{ W/m}^2$  (68%).

Figura 69: Fluxo de calor para os dias 21 e 22 de julho de 2017

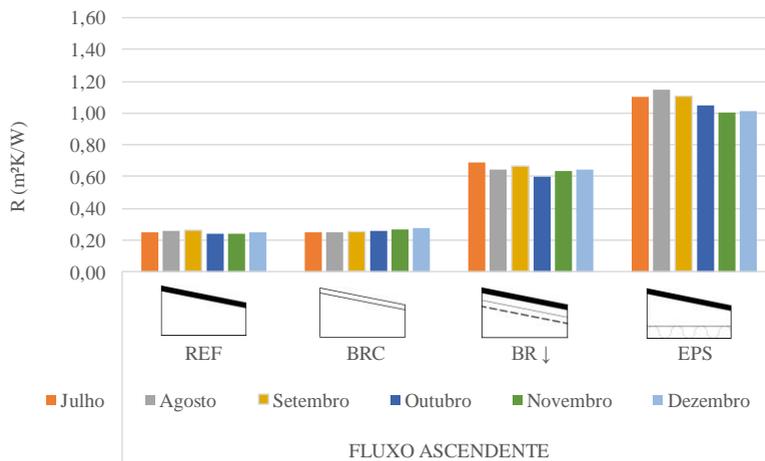


#### ✓ Análise da resistência térmica

A Figura 70 e a Figura 71 mostram a resistência térmica ao longo dos 6 meses de medições, para sentido de fluxo ascendente e descendente, respectivamente.

Observou-se que para o sentido de fluxo ascendente (Figura 70), a resistência térmica para as coberturas de referência (REF) e com telhas brancas (BRC) apresentou valores estáveis ao longo dos meses, com um coeficiente de variação de 3% e de 4,5%, respectivamente. A resistência térmica para a cobertura com barreira radiante (BR↓) apresentou valores entre 0,60 m<sup>2</sup>K/W e 0,69 m<sup>2</sup>K/W, com um coeficiente de variação de 4,7% e a cobertura com poliestireno expandido (EPS) apresentou valores entre 1,0 m<sup>2</sup>K/W e 1,10 m<sup>2</sup>K/W, com um coeficiente de variação de 5%.

Figura 70: Resistência térmica ao longo dos meses – Sentido de fluxo ascendente



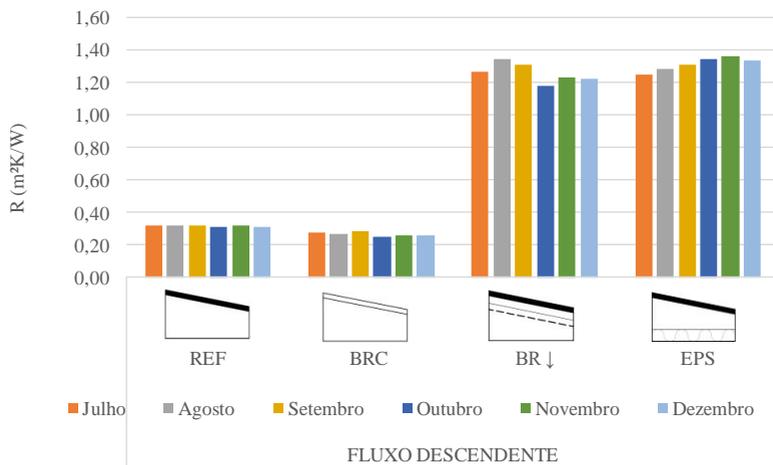
Para o sentido de fluxo descendente (Figura 71), as coberturas de referência (REF) e com telhas brancas (BRC) também apresentaram valores de resistência estáveis, com coeficiente de variação de 1,4% e de 4,4%, respectivamente. A cobertura com barreira radiante (BR↓) apresentou coeficiente de variação de 4,9% e a cobertura com EPS apresentou coeficiente de variação de 3,9%.

A resistência térmica para a cobertura de referência (REF) e para a cobertura de telhas brancas (BRC) apresentou uma diferença de 0,05  $m^2K/W$  (ou 16%) quando as resistências térmicas destas coberturas deveriam fornecer valores similares. A razão para este fato deverá ser motivo para uma futura investigação.

Apesar dos isolamentos das coberturas 3 (BR↓) e 4 (EPS) reduzirem as trocas térmicas de formas diferentes, a resistência térmica para o sentido de fluxo de calor descendente não foi tão diferente. A primeira apresentou a resistência de aproximadamente 1,25  $m^2K/W$  e a segunda de aproximadamente 1,30  $m^2K/W$ , uma diferença de 4,5% entre estas duas coberturas.

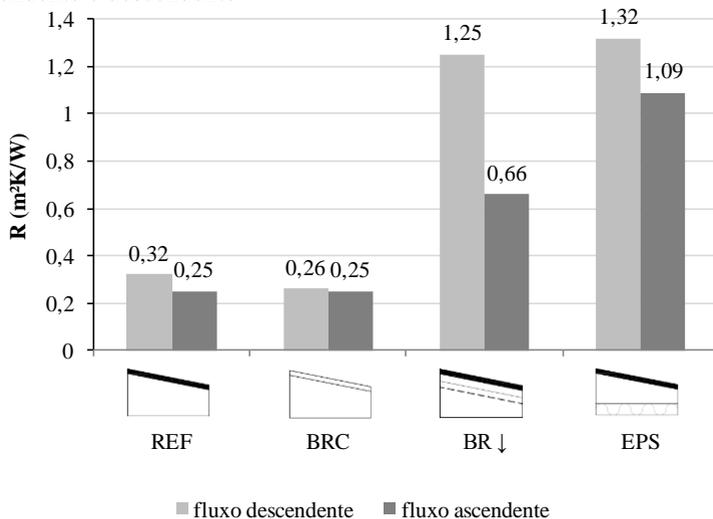
A resistência térmica foi calculada no decorrer de seis meses de medição, com diferentes condições climáticas, as quais interferem nas temperaturas e no fluxo de calor de cada cobertura. Mesmo assim, a resistência térmica se mostrou estável, com coeficientes de variação que atingiram no máximo 5%, valor considerado muito bom para um trabalho experimental.

Figura 71: Resistência térmica ao longo dos meses – Sentido de fluxo descendente



A resistência térmica para o período total foi calculada para cada cobertura considerando os seis meses de medição com o objetivo de se ter um valor de resistência térmica que as caracterizassem, cujos valores estão mostrados na Figura 72.

Figura 72: Resistência térmica por cobertura, para sentido de fluxo ascendente e descendente



Como já observado no Estudo 1, e concordando com a bibliografia, a resistência térmica para o sentido descendente apresentou valores mais elevados do que a para o sentido ascendente. A cobertura de referência (REF) apresentou resistência térmica para o sentido descendente de  $0,32 \text{ m}^2\text{K/W}$  e para o sentido ascendente de  $0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$ . A cobertura com telhas brancas (BRC) apresentou a resistência térmica de  $0,26 \text{ m}^2\text{K/W}$  e de  $0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$  para os sentidos de fluxo descendente e ascendente, respectivamente.

Para o sentido de fluxo de calor descendente, a cobertura com barreira radiante (BR↓) e com EPS aumentaram a resistência térmica em relação à cobertura de referência. A cobertura com barreira radiante (BR↓) apresentou o valor de  $1,25 \text{ m}^2\text{K/W}$  e a cobertura com EPS apresentou a resistência térmica de  $1,32 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Apesar das diferenças entre os isolamentos, um isola por reflexão e apresenta uma espessura muito fina (entre 6 a  $8 \mu\text{m}$ ) e o outro isola por condução e apresenta uma espessura de 5 cm, a diferença nos valores de resistência entre os dois isolamentos foi de aproximadamente 5%.

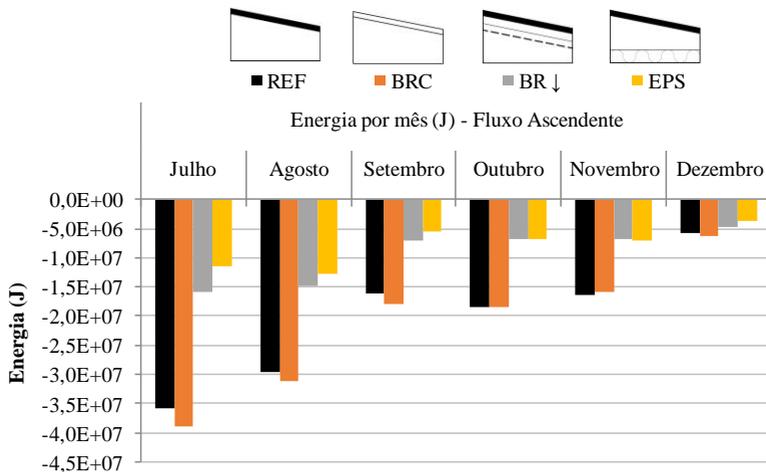
Para o sentido de fluxo ascendente, a cobertura com barreira radiante (BR↓) apresentou a resistência térmica menor que a cobertura com EPS, uma diferença de  $0,43 \text{ m}^2\text{K/W}$ . Desta forma, a cobertura com barreira radiante permite que a cobertura perca mais calor quando comparada com a cobertura com EPS. Esse fenômeno poderia ser explicado pelo fato que a diferença entre as duas é que uma bloqueia por condução, a qual é sempre constante, independentemente das temperaturas, e a outra é por radiação, que tem a temperatura elevada na quarta.

Pode-se dizer que utilizar a barreira radiante para uma cidade de clima quente parece ser ideal, pois reduz o ganho térmico diurno e permite uma maior perda de energia noturna através da cobertura quando comparada com a cobertura com EPS.

A perda de energia através das coberturas de referência, de telhas brancas (BRC), com barreira radiante (BR↓) e com isolamento térmico resistivo (EPS) está mostrada na Figura 73.

Verificou-se que nos meses mais frios, julho, agosto e setembro, a cobertura com telhas brancas (BRC) perdeu mais energia que a cobertura de referência (REF), na proporção de 8,4%, 5,3% e 11,3%, respectivamente, e que nos meses de outubro, novembro e dezembro essa cobertura apresentou perda térmica praticamente igual às perdas da cobertura de referência. As coberturas com barreira radiante (BR↓) e com isolamento resistivo (EPS) reduziram 51% e 58% para o todo o período avaliado.

Figura 73: Perda de energia nas coberturas ao longo dos meses

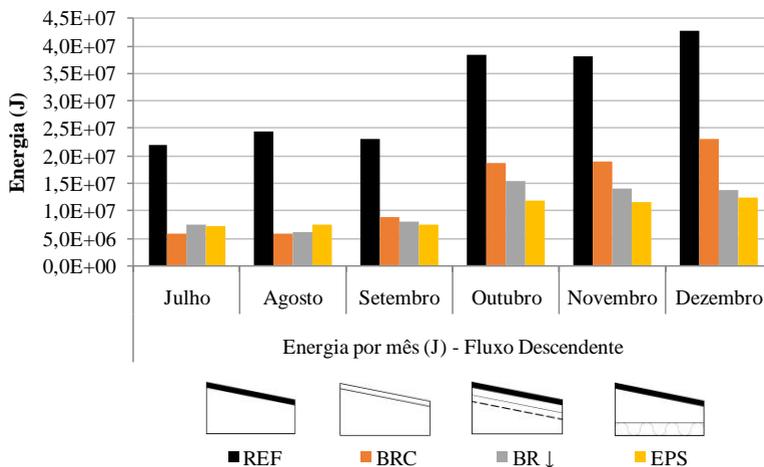


Em relação ao sentido de fluxo descendente, as coberturas de telhas brancas (BRC), com isolamento reflexivo (BR↓) e com isolamento resistivo (EPS) evitaram os ganhos térmicos ao longo dos meses, conforme mostra a Figura 74.

De julho a setembro (período de menor ganho térmico), as três coberturas apresentaram o desempenho semelhante, evitando a transferência de calor para o interior da bancada em aproximadamente 70% em relação a cobertura de referência (REF).

Já para os meses de outubro, novembro e dezembro, em que os ganhos térmicos são predominantes, a cobertura com telhas brancas (BRC) reduziu o ganho térmico em 48%, a cobertura com barreira radiante (BR↓) reduziu em 63% e a cobertura com EPS reduziu em aproximadamente 70%.

Figura 74: Ganho de energia nas coberturas ao longo dos meses

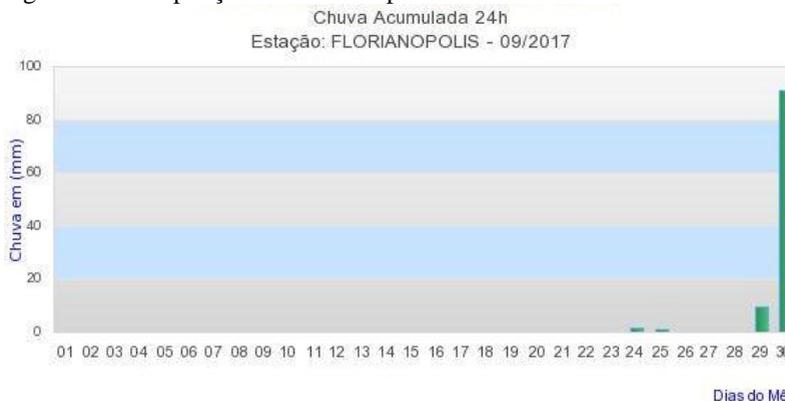


### 3.2.5.2 Coberturas com forro de PVC e telhas cerâmicas

#### a) Avaliação do efeito da adsorção da umidade presente no ar

Para avaliar o efeito da adsorção da umidade do ar no desempenho térmico de telhas cerâmicas escolheu-se um período que não houve precipitação e que não houve condensação noturna na superfície das telhas. O mês com a maior quantidade de dias sem ocorrência de chuvas foi setembro (Figura 75). Durante o mês de agosto a última data de ocorrência de chuva foi 24/08/2017, por essa razão escolheu-se de 3 a 5 de setembro de 2017 para mostrar graficamente os resultados.

Figura 75: Precipitação em Florianópolis/setembro 2017

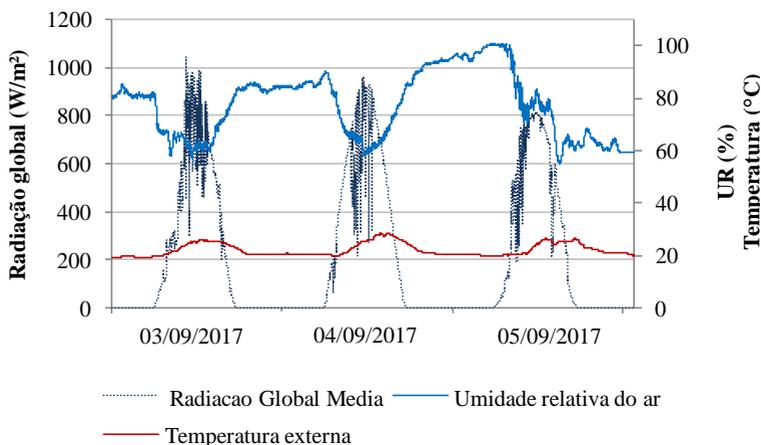


Fonte: [http://www.inmet.gov.br/sim/abre\\_graficos.php](http://www.inmet.gov.br/sim/abre_graficos.php) (Acesso dia 17/01/2018)

A Figura 76 mostra a radiação solar, e temperatura externa e a umidade relativa para o período selecionado. A radiação solar máxima foi de  $1048 \text{ W/m}^2$ , a temperatura externa máxima foi de  $28,6^\circ\text{C}$ , a temperatura mínima de  $19,2^\circ\text{C}$  e a umidade relativa média foi de  $77,5\%$ .

Os figuras que mostram a temperatura superficial das telhas, do ático e do forro estão mostrados no Apêndice 4 (a).

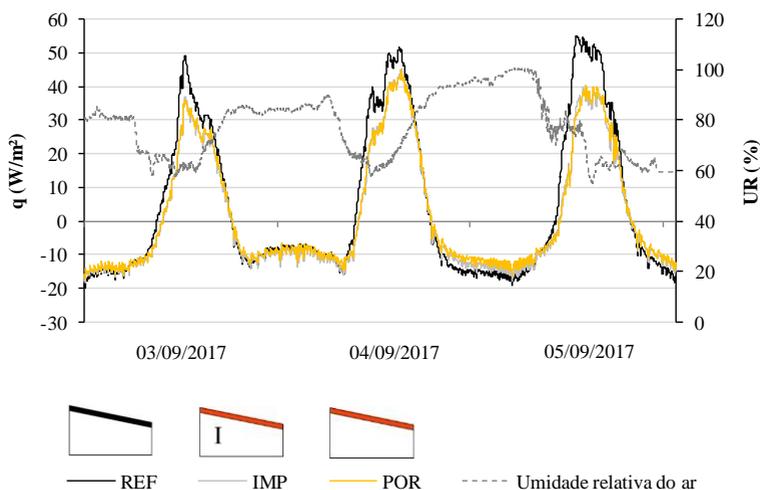
Figura 76: Radiação solar, temperatura do ar externo e umidade relativa de 3 a 5 de setembro 2017



A Figura 77 compara o fluxo de calor entre as coberturas de referência (REF), com telhas cerâmicas impermeáveis (IMP) e com telhas cerâmicas porosas (POR). Para o período, as telhas cerâmicas apresentaram uma redução de  $10 \text{ W/m}^2$ , para o horário de pico, em relação à cobertura de referência. Esta redução está associada a absorvância solar das telhas cerâmicas ser menor do que da telha de fibrocimento da cobertura de referência. A absorvância solar a as telhas cerâmicas foi de 0,52 enquanto que para a telha de fibrocimento foi de 0,70, os quais podem ser vistos no apêndice 3.

Comparando-se coberturas das telhas cerâmicas entre si, impermeáveis (IMP) e porosas (POR), verificou-se que o fluxo de calor nas mesmas foi praticamente o mesmo durante os três dias analisados, uma vez que linhas de fluxo de calor estão sobrepostas.

Figura 77: Fluxo de calor durante 3, 4 e 5 de setembro de 2017

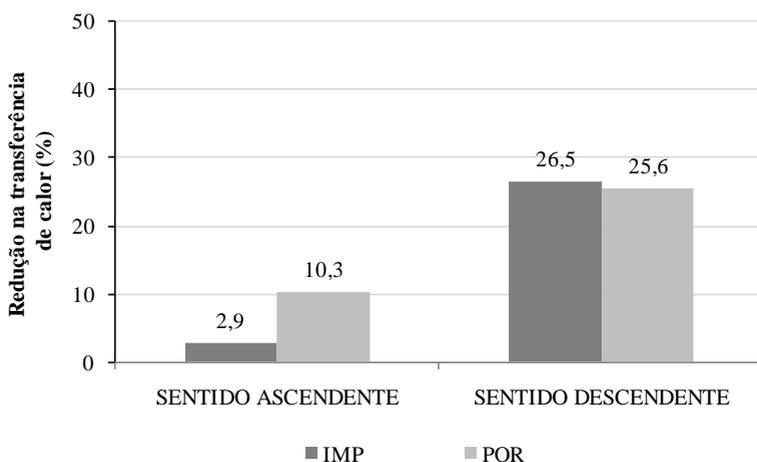


A Figura 78 mostra a redução na transferência de calor para o sentido de fluxo de calor ascendente e descendente nas coberturas com telhas cerâmicas porosas (POR) e impermeáveis (IMP) comparadas à cobertura de referência. Para o sentido de fluxo de calor descendente, a cobertura com telhas impermeáveis (IMP) reduziu a transferência de energia em 26,5% e a com telhas porosas (POR) reduziu em 25,5% em relação à cobertura de referência. Esta redução é devida a absorvância solar das telhas, que na cobertura de referência é de 0,70 e nas coberturas de telhas cerâmicas é de 0,52.

Para o sentido de fluxo ascendente a cobertura com telhas cerâmicas impermeáveis (IMP) apresentou o desempenho térmico similar ao da cobertura de referência, reduzindo a transferência de energia em apenas 2,9%, e a cobertura de cerâmicas porosas (POR) reduziu a transferência de calor em 10,3%, quando comparada com a cobertura de referência (REF). Essa diferença que surgiu na análise ascendente entre a porosa e não-porosa pode não ser muito significativo, pois a quantidade de dados nessa condição não foi muito elevada.

Com base nesses resultados observou-se que a adsorção da umidade presente no ar exerceu pouca influência no desempenho térmico da cobertura com telhas cerâmicas porosas, uma vez que os resultados desta cobertura foram similares aos da cobertura com telhas impermeáveis.

Figura 78: Redução na transferência de calor período de 3 a 5 de setembro de 2017 em comparação com o telhado de referência (fibrocimento)



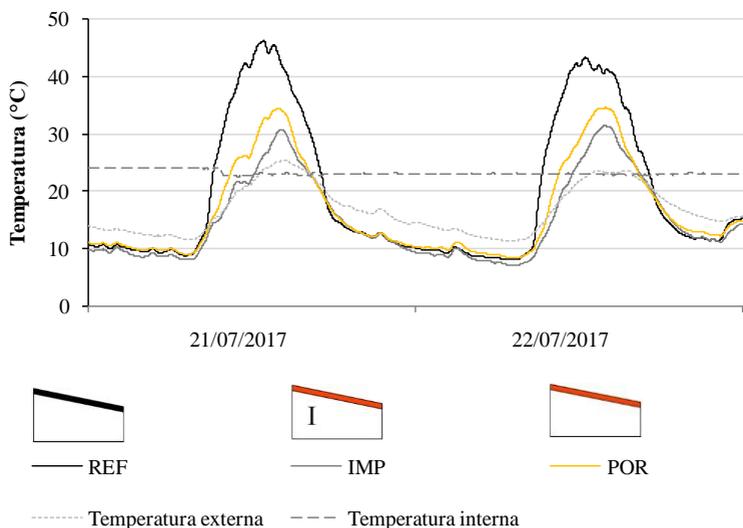
- b) Análise do desempenho térmico em função da absorção a água proveniente da condensação noturna

Um conjunto de fatores associados pode propiciar a condensação da água em superfícies. A condensação geralmente ocorre em noites de céu claro, com baixa velocidade do vento e quando a temperatura de uma superfície da telha é menor que a temperatura de orvalho.

A Figura 79 mostra a temperatura do ponto de orvalho e as temperaturas superficiais das telhas cerâmicas, medidas na face inferior das mesmas, a fim de verificar a ocorrência de condensação. Na madrugada dos dois dias, como as temperaturas das telhas apresentaram valores mais baixos que os valores da temperatura de orvalho, pode-se dizer que houve condensação noturna.

Desta forma, os dias 21 e 22 de julho de 2017 foram selecionados para avaliar o efeito da condensação noturna no desempenho térmico de coberturas com telhas cerâmicas impermeáveis e porosas. Cabe ressaltar que no estudo apresentado no item anterior não houve condensação noturna.

Figura 79: Temperatura de orvalho para os dias 21 e 22 de julho de 2017



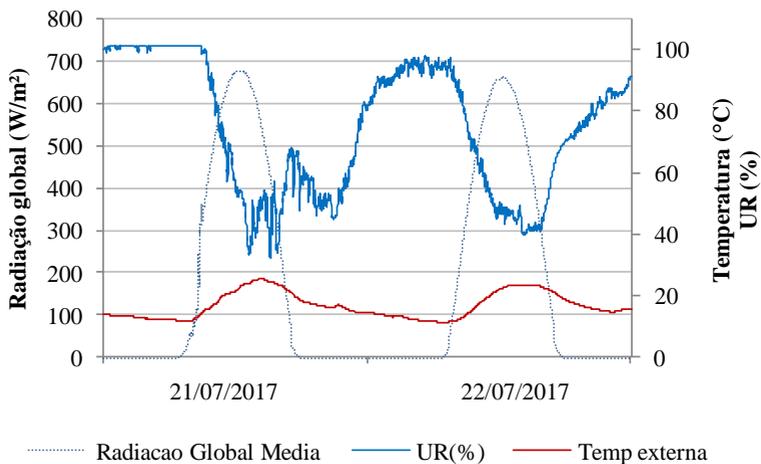
A Figura 80 mostra a fotografia da condensação na superfície das telhas cerâmicas. Observou-se que nas telhas porosas (POR) a água foi absorvida pelo material enquanto que nas telhas impermeabilizadas (IMP) e na cobertura de referência (REF) a água se depositou em forma de gotas na superfície.

Figura 80: Condensação sobre a superfície das telhas cerâmicas



A radiação solar máxima nesses dias foi de  $680 \text{ W/m}^2$ , a temperatura externa máxima foi de  $25,5^\circ\text{C}$ , a temperatura mínima atingiu  $11,3^\circ\text{C}$  e a umidade relativa média nesse período foi de  $74,6\%$  (Figura 81). As figuras que mostram a temperatura superficial inferior das telhas, do ar no ático e da superfície inferior do forro de PVC está mostrada no apêndice 4 (b).

Figura 81: Radiação solar, temperatura do ar externo e umidade relativa de 21 e 22 de julho 2017

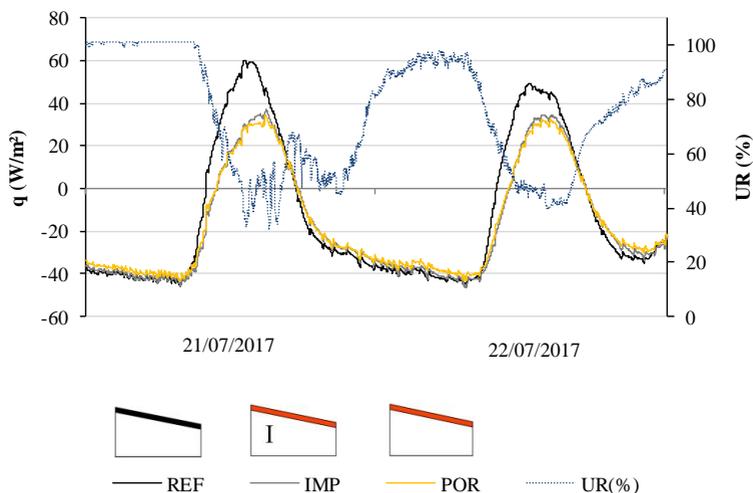


O fluxo de calor no decorrer destes dois dias é mostrado na Figura 82. As coberturas com telhas cerâmicas impermeabilizadas (IMP)

e porosas (POR) apresentaram redução na transferência de calor no horário de pico para o interior da bancada experimental em  $23 \text{ W/m}^2$  e em  $25 \text{ W/m}^2$  quando comparadas com a cobertura de referência, respectivamente. Esta redução deve-se ao fato das telhas cerâmicas apresentarem a absorvância solar mais baixa que da telha de fibrocimento.

Comparando as telhas cerâmicas entre si, as mesmas apresentaram pequena diferença no fluxo de calor. Para o horário de máximo ganho térmico, a cobertura com telhas porosas reduziu  $2 \text{ W/m}^2$  a mais que a cobertura com telhas impermeabilizadas, enquanto que a cobertura com telhas impermeáveis apresentou maiores perdas térmicas ( $3,5 \text{ W/m}^2$  a mais que a cobertura com telhas porosas).

Figura 82: Fluxo de calor no decorrer dos dias 21 e 22 de julho de 2017



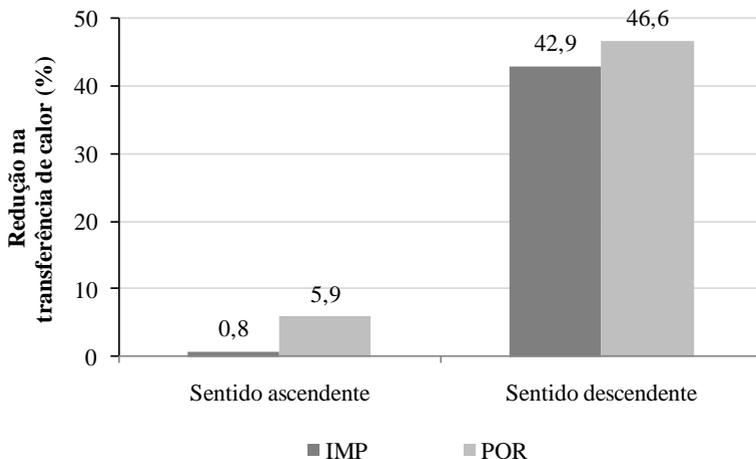
A Figura 83 mostra a redução na transferência de calor das coberturas com telhas impermeáveis e com telhas porosas, ambas comparadas com a cobertura de referência para os dias 21 e 22 de julho.

Para o sentido de fluxo de calor descendente, a cobertura com telhas cerâmicas porosas (POR) reduziu em aproximadamente 47% o fluxo de calor e a cobertura com telhas impermeabilizadas (IMP) o reduziu em 43%, ou seja, apresentaram pouca diferença na redução da transferência de calor para o interior da bancada experimental (4% aproximadamente).

Para o sentido de fluxo ascendente, as coberturas com telhas cerâmicas impermeáveis e porosas reduziram perdas térmicas em 0,8% e

em 5,9%, respectivamente, quando comparadas com a cobertura de referência.

Figura 83: Redução na transferência de calor das coberturas com telhas cerâmicas comparadas com a cobertura de referência (fibrocimento)



Comparando-se os resultados com a cobertura de referência (REF) para o sentido de fluxo descendente, as coberturas de telhas cerâmicas (IMP e POR) apresentaram um bom desempenho térmico, reduzindo em mais de 40% o ganho térmico para os dois dias em que houve condensação. Na cobertura de referência, também houve condensação, porém, devido ao fato da absorvância solar ( $\alpha=0,7$ ) ser maior que das telhas cerâmicas ( $\alpha=0,52$ ), provavelmente a telha se aqueceu mais rapidamente e a água evaporou em um período de tempo menor em relação às telhas cerâmicas.

Comparando as telhas cerâmicas entre si, a redução no ganho térmico apresentou uma diferença de 3,7%, considerada pequena. A razão para este fato, é que em ambas, a água proveniente da condensação está presente, só que a telha porosa a absorve enquanto que na telha impermeabilizada a água se deposita na forma de gotas sobre a superfície.

Devido ao processo de evaporação da água absorvida pela telha porosa, esperava-se uma diferença maior do que a encontrada (3,7%). A pequena diferença de desempenho entre a cobertura com telhas cerâmicas impermeáveis e a com telhas cerâmicas porosas para o sentido de fluxo descendente, pode ser atribuída ao fato de que o processo de evaporação

ocorre em ambas as coberturas, já que as gotículas condensadas não chegam a escorrer, as quais se mantêm na superfície, conforme mostrado na Figura 80.

c) Análise do desempenho térmico em função da absorção a água proveniente da chuva

Para avaliar o efeito da absorção da água proveniente da chuva selecionou-se um dia com bastante nebulosidade no céu e chuva fraca, mas constante ao longo do dia. Durante o dia 23 de agosto de 2017 houve precipitação acumulada de 8 mm, de acordo com a estação meteorológica do LEPTEN – Laboratório de Engenharia de Processos de Conversão e Tecnologia de Energia.

Selecionou-se um dia anterior e três dias após o dia da chuva, totalizando o período de cinco dias para mostrar o efeito da absorção da água da chuva pela cobertura de telha cerâmica porosa (POR) e comparar seu desempenho com o da cobertura de referência (REF) e com o da cobertura de telha cerâmica impermeabilizada (IMP).

Durante esse período (de 22/08 a 26/08 de 2017) a radiação solar máxima atingiu  $1004 \text{ W/m}^2$ , a temperatura externa máxima foi de  $26,6^\circ\text{C}$  e a mínima atingiu  $10,6^\circ\text{C}$  (Figura 84). Para o referido período a estação meteorológica não coletou dados de umidade relativa do ar, por esta razão o índice pluviométrico para o período está na Figura 85.

Figura 84: Radiação solar e temperatura do ar externo para o período de 22 a 26 de agosto de 2017

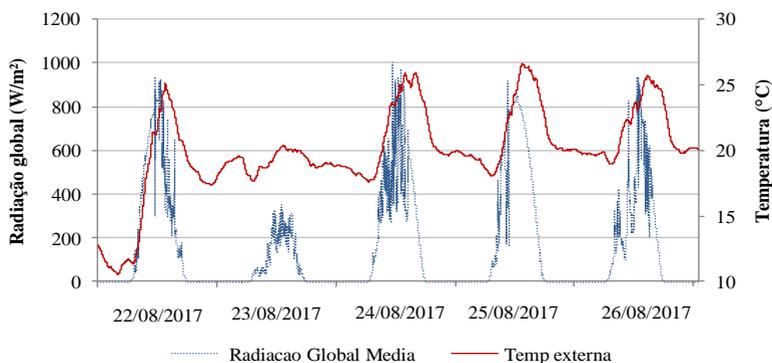
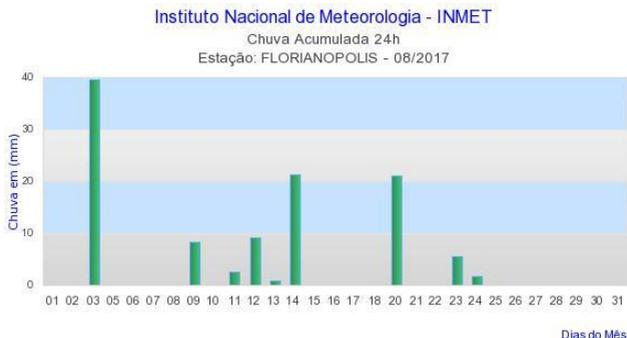


Figura 85: Índice pluviométrica para agosto de 2017

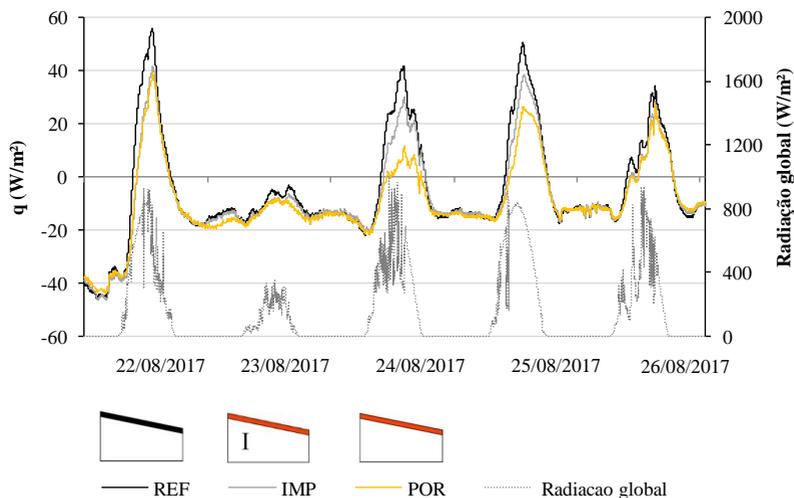


Fonte: <http://www.inmet.gov.br>

A Figura 86 mostra a variação do fluxo de calor na cobertura de referência (REF), na cobertura com telha cerâmica impermeável (IMP) e cobertura com telha cerâmica porosa (POR). Observou-se que durante o dia 23 de agosto de 2017 a radiação solar máxima foi de  $351 \text{ W/m}^2$  e os dias 24, 25 e 26 de agosto foram ensolarados, com radiação solar que ultrapassou  $800 \text{ W/m}^2$ .

No dia 22 de agosto, anterior ao dia da chuva observou-se pouca diferença no fluxo de calor entre as coberturas de telha porosa (POR) e não-porosa (IMP). No dia 23 de agosto, o qual foi nublado e com chuva leve ao longo do mesmo, todas as coberturas apresentaram um fluxo de calor similar, comprovando que as superfícies externas das telhas das três coberturas analisadas neste estudo apresentaram o mesmo desempenho quando expostas a radiação de onda longa.

Figura 86: Fluxo de calor nas coberturas de referência, com telhas cerâmicas impermeáveis e com telhas cerâmicas porosas.

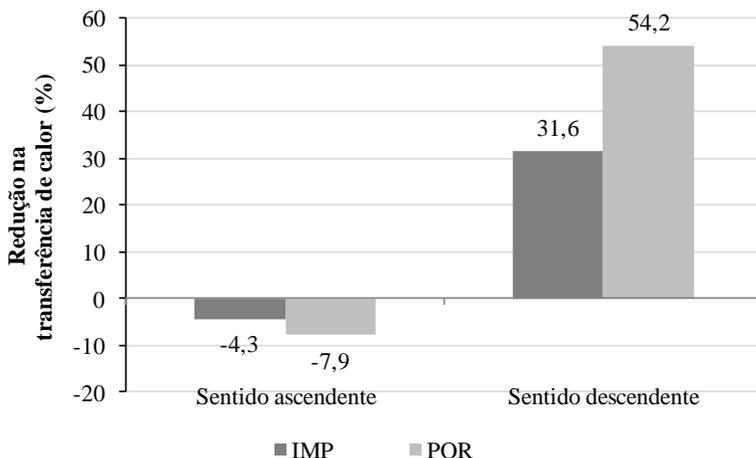


No decorrer do dia 24/08, a cobertura com telha cerâmica porosa (POR) apresentou uma redução do ganho térmico de 85% em relação à cobertura de referência (REF) e de 78% em relação à cobertura de telhas impermeáveis (IMP). No dia 25/08 a cobertura de telhas cerâmicas porosas (POR) apresentou um ganho térmico 51% menor do que na cobertura de referência (REF) e 34% menor em relação à cobertura de telhas cerâmicas impermeáveis (IMP). Já no dia 26/08 percebeu-se pouca diferença no ganho térmico das telhas cerâmicas quando comparadas entre si. A diferença em relação à cobertura de referência neste dia é referente a absorvidade solar das telhas, que na de fibrocimento é de 0,7 e nas cerâmicas é de 0,52.

A Figura 87 mostra a redução na transferência de calor para o período de 22 a 26 de agosto de 2017. Para o sentido de fluxo de calor descendente a cobertura com telha porosa (POR) foi 22,5% mais eficiente do que a cobertura com telhas impermeáveis (IMP) e 54,2% mais eficiente que a cobertura de referência (REF).

Para o sentido de fluxo de calor ascendente, as coberturas com telhas cerâmicas impermeabilizadas (IMP) e porosas (POR) apresentaram uma diferença pequena nas perdas térmicas, de aproximadamente 4%.

Figura 87: Redução na transferência de calor das coberturas com telhas cerâmicas comparadas com a cobertura de referência no período de 5 dias.



Assim esses resultados mostram que a absorção da água proveniente da chuva, nas condições ocorridas nesse período, apresentou grande influência na melhora do desempenho térmico da cobertura com telhas cerâmicas porosas (POR) em relação à cobertura de referência (REF) e também, em relação à cobertura com telhas cerâmicas impermeabilizadas (IMP).

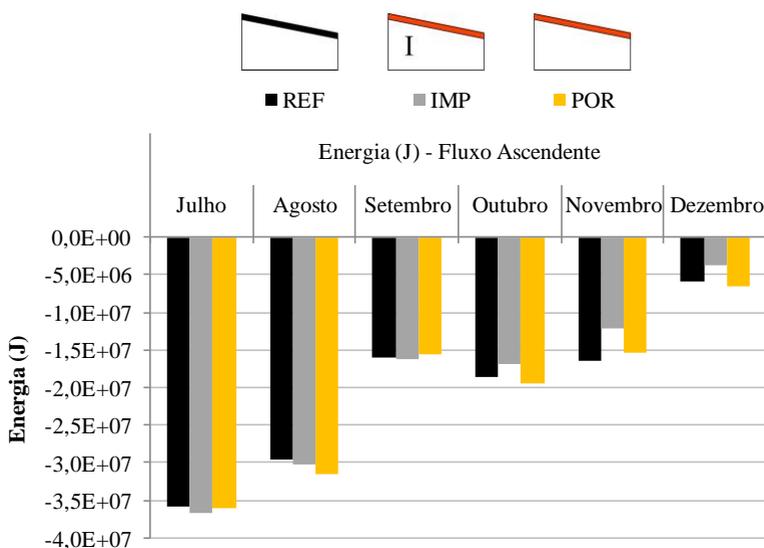
Por meio dos ensaios realizados constatou-se que a adsorção ao vapor d'água e a condensação da água na superfície das telhas apresentaram pouca influência no desempenho térmico das coberturas no período de 6 meses. O efeito da condensação não foi expressivo ao longo dos seis meses de medição porque, no inverno de Florianópolis, a condensação ocorreu em poucos dias. Além disso, nas edificações brasileiras, o ganho térmico é responsável pela maioria das horas de desconforto térmico e apresenta maior impacto no consumo de energia, sendo assim, a redução na transferência de calor proporcionada pela evaporação da água advinda da condensação não apresentou influência nesse sentido, uma vez que a condensação noturna geralmente ocorre no inverno, cujo período não é necessário evitar os ganhos térmicos.

Quando analisamos a absorção da água da chuva pelas telhas cerâmicas porosas percebeu-se uma melhora no desempenho térmico em relação às demais coberturas. A absorção da água da chuva pelos poros da telha ocorreu ao longo do dia 23/08 (choveu fraco durante o dia), a

qual foi evaporada no decorrer dos dois dias seguintes ao da chuva. Para o sentido de fluxo de calor descendente a cobertura de telhas porosas (POR) reduziu a transferência de calor para o interior em 54,2% enquanto que a cobertura de telhas impermeáveis (IMP) reduziu em 31,6% em relação à cobertura de referência (REF). Para o sentido de fluxo ascendente, a cobertura com telhas porosas (POR) aumentou as perdas térmicas em 7,9% e a cobertura com telhas impermeáveis (IMP) aumentou as perdas em 4,3%.

A Figura 88 mostra a perda de energia que ocorreu ao longo dos meses de medição (de julho a dezembro de 2017) para as coberturas de referência (REF), com telhas cerâmicas impermeáveis (IMP) e com telhas cerâmicas porosas (POR). Os meses de julho e setembro foram os mais secos, com pouca ocorrência de precipitação, e nesses meses observou-se pouca diferença entre as três coberturas. Para os meses de outubro, novembro e dezembro a cobertura com telhas cerâmicas impermeáveis (IMP) foi a que mais perdeu energia em relação à cobertura de referência (REF). A cobertura de telhas cerâmicas porosas (POR) apresentou desempenho térmico similar ao da cobertura de referência.

Figura 88: Perda de energia para as coberturas de referência, com telhas cerâmicas porosas e com telhas impermeáveis



O ganho térmico ao longo dos meses de julho a dezembro de 2017 nas coberturas de telhas cerâmicas e de referência está mostrado na Figura 89. Para todos os meses as coberturas com telhas cerâmicas reduziram o ganho térmico em relação à cobertura de referência, sendo que a cobertura com telhas impermeáveis (IMP) reduziu em 24,7% e a cobertura com telhas porosas diminuiu em 34,6%.

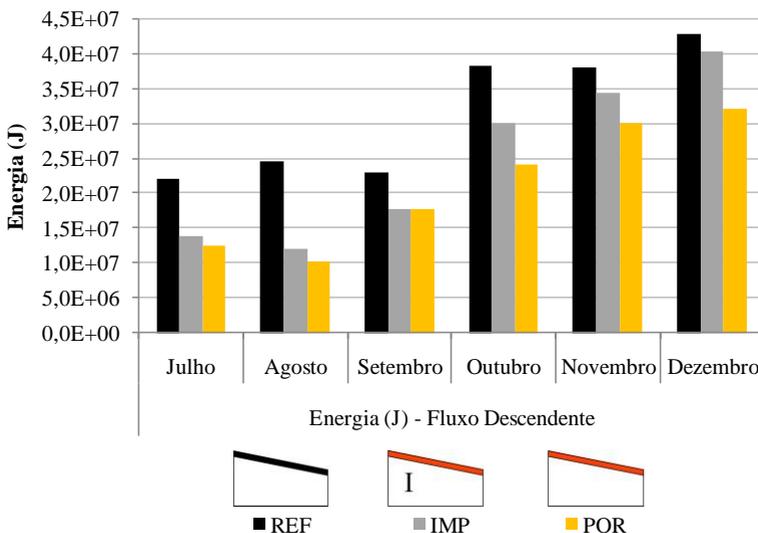
Os meses de julho e setembro foram os meses com menor incidência de chuvas. Em julho verificou-se uma diferença de 5,5% no desempenho térmico das coberturas com telhas cerâmicas porosas (POR) e impermeáveis (IMP), e no decorrer deste mês houve condensação da água na superfície das telhas, sendo que essa diferença pode ser em função da evaporação da água.

Já em setembro, não houve condensação noturna e houve pouca incidência de chuva (apenas no último dia do mês) e percebeu-se que as coberturas com telhas cerâmicas porosas (POR) e impermeáveis (IMP) apresentaram praticamente o mesmo desempenho, com diferença de apenas 0,5%, evidenciando a pouca influência da adsorção ao vapor no desempenho térmico da cobertura com telhas porosas.

Nos meses de outubro, novembro e dezembro houve maior incidência de chuvas e pode-se perceber clara diferença no desempenho térmico das telhas cerâmicas porosas (POR) e impermeáveis (IMP), sendo que a cobertura com telhas porosas apresentou melhor desempenho em função da evaporação da água. A diferença no desempenho térmico entre as coberturas de telhas cerâmicas porosas (POR) e impermeáveis (IMP) foi de 15,7% em outubro, de 11,3% em novembro e de 18,8% em dezembro.

Ao longo dos seis meses, as coberturas de telhas porosas (POR) e de telhas impermeáveis apresentaram uma diferença de 10%, sendo que a de telhas porosas foi a que apresentou maiores reduções no ganho térmico.

Figura 89: Perda de energia para as coberturas de referência, com telhas cerâmicas porosas e com telhas impermeáveis



### 3.2.5.3 Telhado verde

#### a) Desempenho térmico de um telhado verde

O desempenho térmico da cobertura verde foi analisado ao longo de seis meses de medição, de julho a dezembro de 2017 e selecionou-se um período de temperaturas quentes e outro período de temperaturas amenas para mostrar dados de temperaturas e fluxo de calor.

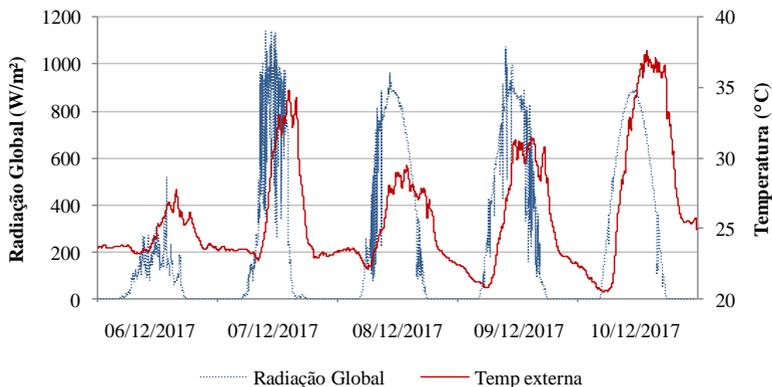
#### ✓ Período de temperaturas quentes

O período de temperaturas quentes selecionado para mostrar o comportamento de temperaturas e do fluxo de calor foi do dia 6 ao dia 10 de dezembro de 2017. Apesar de ainda não ser verão nesse período, as temperaturas máximas externas foram altas.

Choveu apenas ao longo do dia 06 e nos demais dias a radiação solar atingiu mais de 1000 W/m<sup>2</sup>, com temperatura externa entre 37,1°C e 20,5°C, conforme mostra a Figura 90. O sensor de umidade fornecido pelo LEPTEN apresentou problemas, portanto utilizaram-se os valores

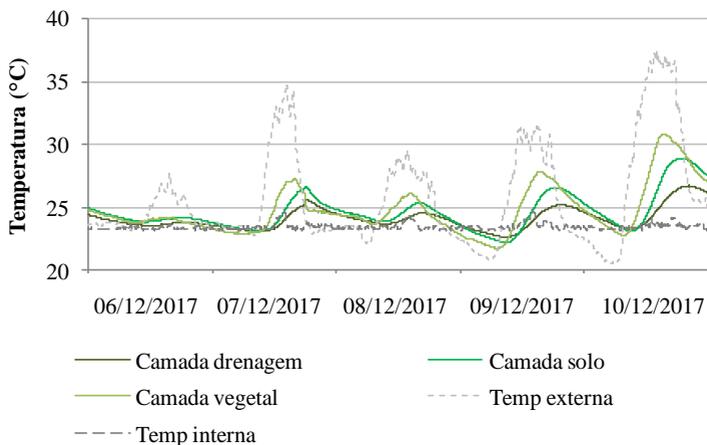
fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A umidade média relativa do ar para o período foi de 80%.

Figura 90: Radiação solar e temperatura do ar de 06 a 10 de dezembro de 2017



A Figura 91 mostra as temperaturas na camada de drenagem, na camada do solo e na superfície vegetal, as quais foram amortizadas em relação a temperatura externa. Devido às suas propriedades difusas, as camadas de drenagem e do solo adicionaram massa térmica ao sistema, retardando o processo de transferência de calor.

Figura 91: Temperaturas nas camadas do telhado verde



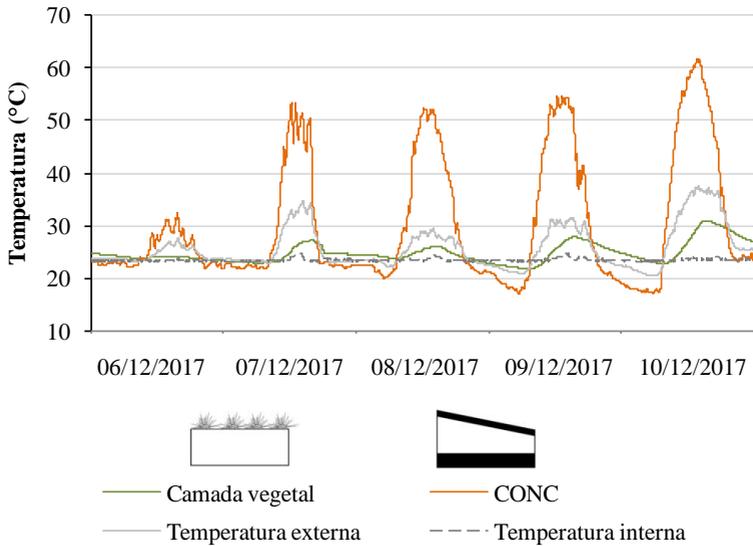
A camada de vegetação também exerce papel fundamental ao reduzir a incidência da radiação solar na superfície do solo e também por aumentar as trocas por evapotranspiração, contribuindo para a redução da temperatura superficial do solo. Essa redução pode ser em maior ou menor escala em função de algumas variáveis, uma das principais é o fator de área foliar (*Leaf Area Index – LAI*), quanto maior a densidade da cobertura vegetal, maiores são as reduções no fluxo de calor (THEODOSIOU, 2003; YAGHOUBIAN e SREBRIC, 2015).

A amplitude térmica média diária no período analisado foi de 4,7°C para a camada vegetal de 3,3 °C para a camada referente ao solo e 2,1°C para a camada de drenagem (Figura 91). O uso do telhado verde amortizou a amplitude térmica diária quando comparada com a amplitude da temperatura externa.

Observou-se que conforme os dias foram passando, a amplitude térmica diária aumentou, por exemplo, no dia 07/12/2017 a amplitude térmica encontrada na camada referente ao solo foi de 3,5°C e para o dia 10/12/2017 esse valor foi de 5,8°C. A razão para esse fato pode estar associada ao processo de evaporação da água presente no solo, uma vez que choveu no dia 06/12/2017 e os demais dias foram ensolarados. PARIZOTTO e LAMBERTS (2011) mostraram que quanto maior o conteúdo volumétrico de água no solo, menores são as temperaturas do mesmo.

A Figura 92 mostra a temperatura superficial da telha da cobertura com fibrocimento com laje de concreto (CONC) e da camada vegetal. A grande diferença de temperatura superficial entre a telha de fibrocimento (CONC) e a cobertura vegetal chamou a atenção, uma vez que alcançou valores de até 30°C.

Figura 92: Temperatura superficial das telhas e da camada vegetal



A temperatura superficial do solo pode afetar o consumo de energia das edificações, que depende da quantidade total de radiação solar absorvida pela superfície, do teor de umidade e das propriedades térmicas do solo. Essas variáveis podem ser afetadas pelo nível do revestimento do solo, uma vez que dependendo do tipo da vegetação escolhida o solo poderá ficar mais ou menos exposto à radiação solar. Além disso, a camada de vegetação auxilia no processo de evapotranspiração. Quanto maior a densidade foliar da vegetação menor é a temperatura da superfície do solo devido ao sombreamento, ao aumento do teor de umidade na superfície do solo e a evaporação da umidade existente no solo (THEODOSIOU, 2003b; YAGHOUBIAN e SREBRIC, 2015).

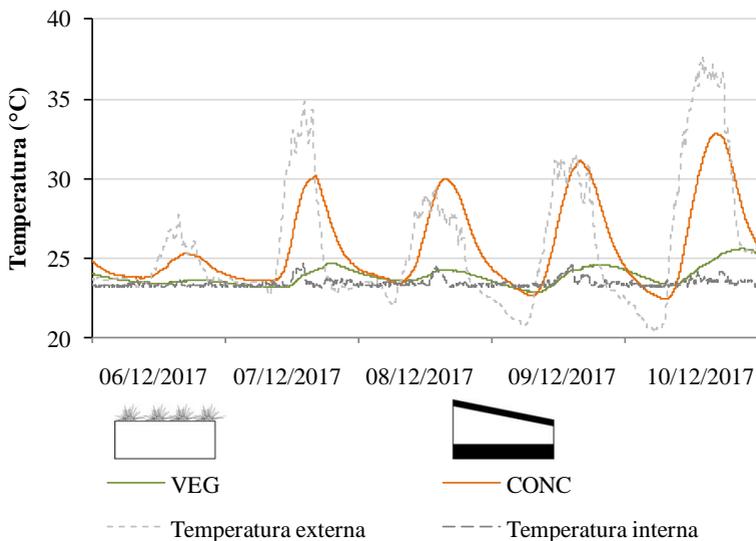
Para o dia mais quente do período (10/12/2017) enquanto a temperatura máxima da telha de fibrocimento chegou a de 61,7°C, a temperatura máxima da cobertura vegetal foi de 30,8°C, com uma diferença de mais de 30°C.

No que se refere as temperaturas mínimas da superfície vegetada (VEG) e da telha de fibrocimento (CONC) no decorrer do período observou-se que a cobertura verde apresentou valores similares ao da temperatura externa, enquanto que a temperatura superficial da telha apresentou valores mais baixos que a temperatura externa.

A temperatura da superfície inferior da laje de concreto está mostrada na Figura 93. No decorrer do dia 06/12/2017 o dia permaneceu nublado e houve a ocorrência de chuvas, as temperaturas superficiais não apresentaram aumento elevado. A temperatura da laje de concreto da cobertura verde (VEG) se apresentou similar a temperatura do ar no interior da bancada, igual a  $23,5^{\circ}\text{C}$ , e a temperatura da laje da cobertura com telha de fibrocimento (CONC) atingiu aproximadamente  $25^{\circ}\text{C}$ .

No decorrer dos demais dias observou-se uma elevação na temperatura da superfície inferior da laje de concreto para ambas as coberturas. Para a cobertura verde (VEG) essa temperatura variou de  $22,9^{\circ}\text{C}$  a  $25,6^{\circ}\text{C}$ , com amplitude térmica máxima  $2,3^{\circ}\text{C}$  e para a cobertura com telhas de fibrocimento (CONC) a temperatura da superfície inferior da laje de concreto variou de  $22,4^{\circ}\text{C}$  a  $32,8^{\circ}\text{C}$ , apresentando uma amplitude térmica máxima superior a  $10^{\circ}\text{C}$ .

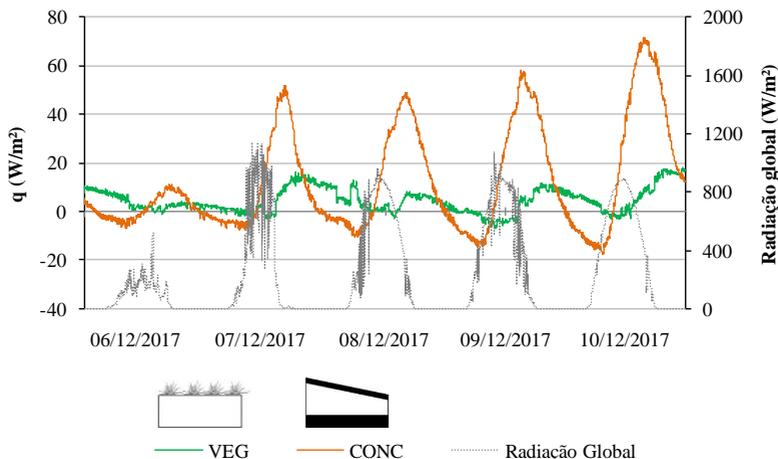
Figura 93: Temperaturas da superfície inferior do forro



Quanto ao fluxo de calor, mostrado na Figura 94, verificou-se que a cobertura verde (VEG) contribuiu significativamente para reduzir a transferência de calor para o interior da bancada experimental, com exceção do dia 06/12/2017 (nublado e com ocorrência de precipitação) em que as duas coberturas apresentaram o desempenho térmico similar, com fluxo de calor máximo de  $10,9 \text{ W/m}^2$  e de  $10,3 \text{ W/m}^2$  para a cobertura

com telhas de fibrocimento (CONC) e para a cobertura verde (VEG), respectivamente.

Figura 94: Fluxo de calor através da cobertura verde e do telhado de fibrocimento



Para o dia mais quente do período (10/12/2017) a cobertura de telhas de fibrocimento (CONC) permitiu a transferência de 71,6 W/m<sup>2</sup> enquanto que a cobertura verde (VEG) permitiu a passagem de 18 W/m<sup>2</sup>, para o horário de pico. Em valores percentuais, para o período de 7 a 10/12/2017, a cobertura verde (VEG) reduziu os ganhos térmicos em 74,3% e evitou as perdas térmicas de 72%.

Nesse período é possível observar o atraso térmico proporcionado pela massa térmica das camadas da cobertura verde (VEG). O horário de máximo ganho térmico para a cobertura com telha de fibrocimento (CONC) variou a cada dia, mas geralmente ocorreu entre as 13 horas e 15 horas, com fluxo de calor máximo acima de 50 W/m<sup>2</sup>, já para a cobertura verde (VEG) o horário de máximo ganho solar geralmente iniciou a partir das 15 horas e 40 minutos e se prolongou até pelo menos às 21 horas e 30 minutos, apresentando fluxos de calor acima de 10 W/m<sup>2</sup>.

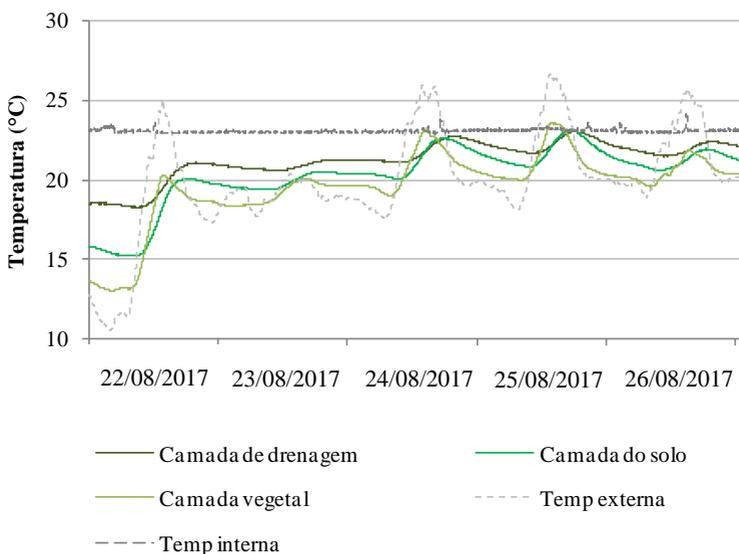
- ✓ Período de temperaturas amenas

O período de temperaturas amenas selecionado para realizar a análise foi de 22 a 26 de agosto de 2017. Neste intervalo de dias, a

radiação solar máxima atingiu  $1004 \text{ W/m}^2$ , a temperatura externa máxima foi de  $26,6^\circ\text{C}$  e a mínima atingiu  $10,6^\circ\text{C}$  (Figura 84). Houve ocorrência de precipitação em apenas 1 dia, 23 de agosto de 2017, correspondendo a um total acumulado de 8 mm.

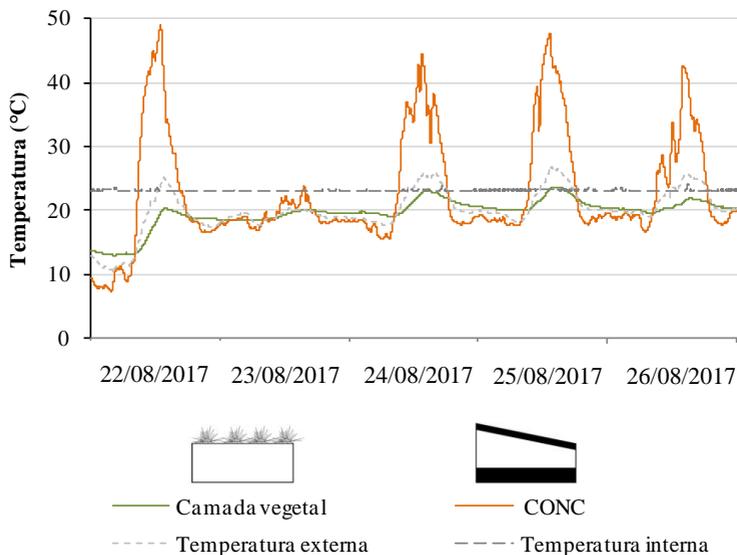
A Figura 95 mostra a temperatura nas camadas de drenagem, do solo e da vegetação ao longo do período selecionado. A amplitude térmica média foi de  $1,5^\circ\text{C}$  na camada de drenagem,  $2,4^\circ\text{C}$  na camada do solo e  $3,8^\circ\text{C}$  na camada de vegetação. O uso da cobertura verde amortizou a amplitude da temperatura externa, que foi de  $6,8^\circ\text{C}$ .

Figura 95: Temperaturas nas camadas do telhado verde



Durante o período de temperaturas amenas a cobertura verde (VEG) apresentou grande diferença na temperatura superficial das telhas quando comparado a cobertura com telhas de fibrocimento (CONC) (Figura 96). A cobertura verde reduziu as temperaturas máximas diárias e aumentou as mínimas. Por exemplo, no dia 22/08/2017, dia mais frio do período analisado, a temperatura da telha de fibrocimento (CONC) apresentou temperatura máxima de  $49,1^\circ\text{C}$  e mínima de  $7,3^\circ\text{C}$ , enquanto que o telhado vegetado (VEG) apresentou a temperatura máxima de  $20,3^\circ\text{C}$  e a mínima de  $13^\circ\text{C}$ .

Figura 96: Temperatura superficial das telhas e da camada vegetal

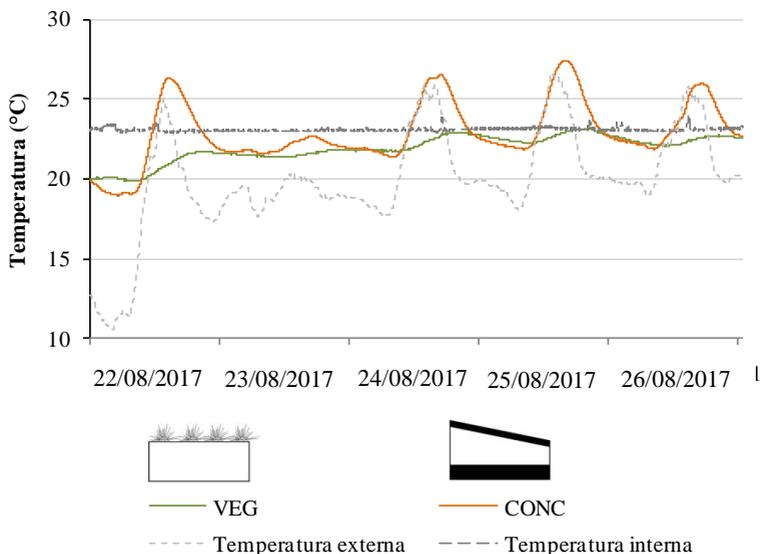


A cobertura verde (VEG) apresentou variação na amplitude térmica média para o período analisado bem menor do que para a cobertura com telhas de fibrocimento (CONC). Enquanto que na primeira a variação média foi de  $3,8^{\circ}\text{C}$ , na segunda a variação média foi de  $26,8^{\circ}\text{C}$ .

A temperatura da superfície inferior da laje de concreto (Figura 97) seguiu a mesma tendência da temperatura das telhas, porém, com menor variação diária das temperaturas. Durante o período noturno, a temperatura superficial da laje de concreto de ambas as coberturas se manteve similar em aproximadamente  $21^{\circ}\text{C}$ .

A amplitude da temperatura superficial da laje da cobertura verde (VEG) variou  $1,8^{\circ}\text{C}$  no dia 22/08/2017 e aproximadamente  $1^{\circ}\text{C}$  nos demais dias. A temperatura da laje da cobertura com telhas de fibrocimento (CONC) variou  $7,3^{\circ}\text{C}$  no dia 22/08/2017 e aproximadamente  $5^{\circ}\text{C}$  nos demais dias.

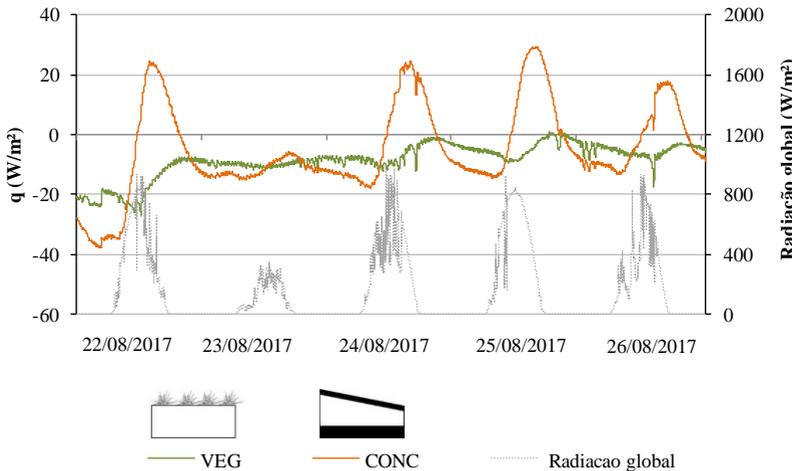
Figura 97: Temperatura da superfície inferior da laje de concreto



O fluxo de calor nas duas coberturas está mostrado no Figura 98. Observou-se que a cobertura verde (VEG) apresentou fluxo de calor negativo a maior parte de tempo, variando de  $-22 \text{ W/m}^2$  (dia 22/08/2017) a  $0,8 \text{ W/m}^2$  (25/08/2017). A cobertura com telhas de fibrocimento (CONC) apresentou fluxo de calor que variou de  $-38 \text{ W/m}^2$  (22/08/2017) a  $29,2 \text{ W/m}^2$  (25/08/2017) para o período de análise (relembrando que o fluxo negativo significa perda de calor para o ambiente externo).

Verificou-se maior atraso térmico na cobertura verde (VEG) em relação a com telhas de fibrocimento (CONC). O atraso térmico decorre em função da massa térmica adicionada pelas camadas de drenagem e do solo. Enquanto a cobertura com telhas de fibrocimento (CONC) apresentou sinais de ganho térmico a partir das 9 horas, a cobertura verde (VEG) apresentou sinais de ganho térmico a partir das 13 horas.

Figura 98: Fluxo de calor na cobertura verde e na cobertura com telhas de fibrocimento

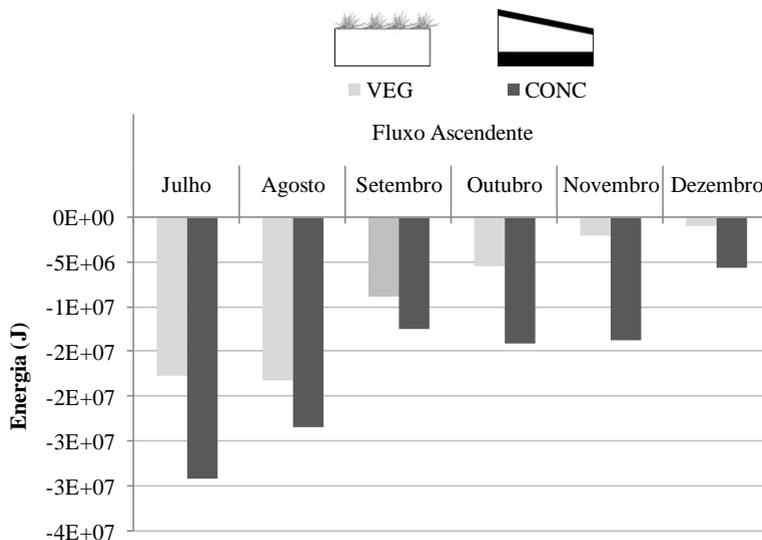


Avaliou-se o desempenho térmico da cobertura verde (VEG) e da cobertura com telhas de fibrocimento (CONC) de julho a dezembro para os sentidos de fluxo de calor ascendente e descendente.

Com o passar dos meses observou-se que houve reduções das perdas de energia e aumento no ganho energético para ambas as coberturas em função da alteração do clima, no mês de julho é inverno e o sentido de fluxo de calor predominante é o ascendente, enquanto que em dezembro (verão) o sentido de fluxo de calor predominante é o descendente, conforme pode ser visualizado na Figura 99 e na Figura 100, respectivamente.

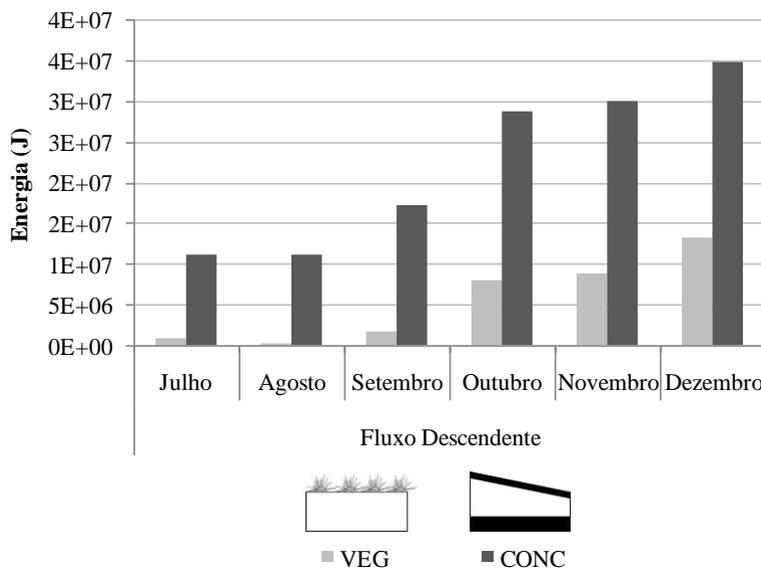
Ao avaliar o desempenho térmico da cobertura verde para o sentido de fluxo ascendente verificou-se para todos os meses avaliados houve melhora no desempenho térmico, sendo que nos meses de julho, agosto e setembro, a cobertura verde (VEG) reduziu as perdas térmicas em 40%, 22% e 29%, respectivamente, em relação a cobertura com telhas de fibrocimento (CONC). Para os meses de outubro, novembro e dezembro essa redução foi maior, 61%, 85% e 81%, respectivamente.

Figura 99: Energia mensal na cobertura verde e na cobertura com telhas de fibrocimento para sentido de fluxo ascendente



A Figura 100 compara o fluxo energético no decorrer dos meses de julho a dezembro de 2017 para o sentido de fluxo de calor descendente nas coberturas verde (VEG) e com telhas de fibrocimento (CONC). Pode-se dizer que a cobertura verde (VEG), nos seis meses de análise, apresentou bom desempenho térmico. Para os meses de julho, agosto e setembro, a cobertura verde apresentou redução na transferência de calor de 92%, 97% e 89%, respectivamente. Para os meses de outubro, novembro e dezembro (em que houve maior transferência de calor no sentido descendente), as reduções foram de 72%, 71% e 62%, nessa mesma ordem.

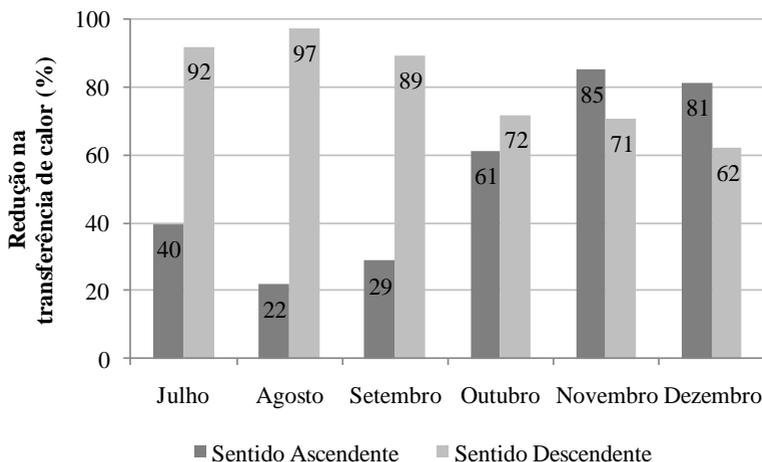
Figura 100: Energia mensal na cobertura verde e na cobertura com telhas de fibrocimento para sentido de fluxo descendente



A Figura 101 mostra a redução na transferência de calor da cobertura verde (VEG) em relação à cobertura com telhas de fibrocimento (CONC) de julho a dezembro de 2017, para os sentidos de fluxo de calor ascendente e descendente.

Para o período de temperaturas amenas, ou seja, nos meses de julho, agosto e setembro de 2017, a cobertura verde (VEG) evitou as perdas térmicas em 40%, 22% e 29% e evitou o ganho térmico em 92%, 97% e 89%, respectivamente. Em relação ao período de temperaturas quentes, referente aos meses de outubro, novembro e dezembro, a cobertura verde (VEG) reduziu as perdas térmicas em 61%, 85% e 81% e os ganhos térmicos em 72%, 71% e 62%, respectivamente.

Figura 101: Redução na transferência de calor da cobertura verde em relação a cobertura com telhas de fibrocimento



#### 3.2.5.4 Comparação de todos os sistemas de coberturas da bancada experimental

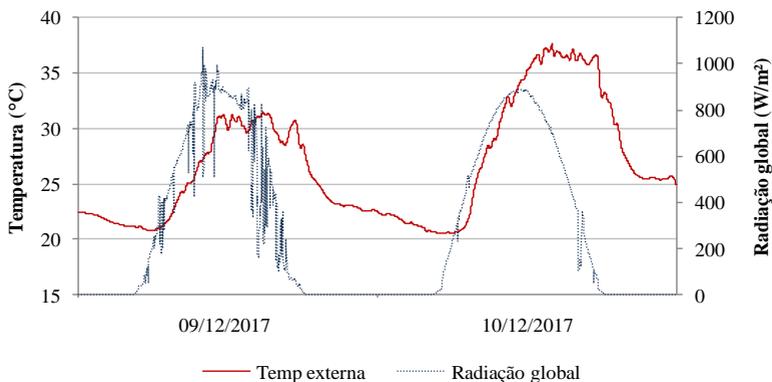
Esta seção apresenta a comparação direta entre os oito tipos de coberturas. A primeira análise refere-se ao período quente (09 e 10 de dezembro de 2017) e a segunda análise é relacionada ao período de temperaturas amenas (21 e 22 de julho de 2017).

Em um primeiro momento são analisadas a temperatura superficial das telhas, a superfície inferior do forro e o fluxo de calor, e em seguida o desempenho térmico mensal de cada cobertura em relação a cobertura de referência.

##### ✓ Período de temperaturas elevadas

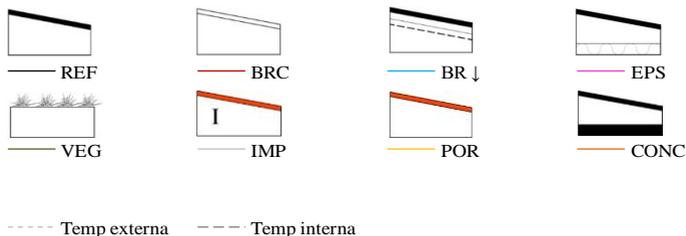
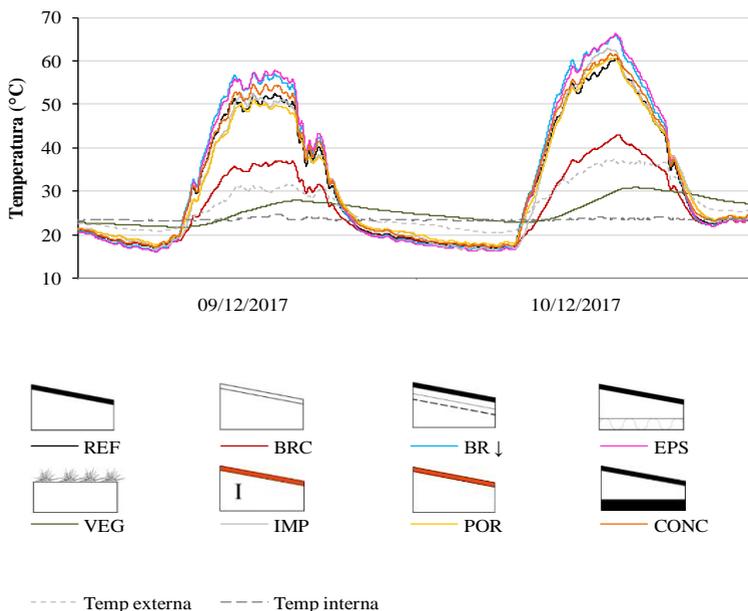
Os dias 9 e 10 de dezembro de 2017 foram selecionados para mostrar o comportamento térmico das coberturas durante o período de temperaturas altas. Nesses dias, a temperatura externa máxima foi de 37,6°C e a mínima foi de 20,8°C. Os dias foram ensolarados com radiação solar máxima foi de 1070 W/m<sup>2</sup>, conforme a Figura 102.

Figura 102 Temperatura externa e radiação global para os dias 9 e 10 de dezembro de 2017



A temperatura superficial das telhas estão mostradas na Figura 103. As telhas cerâmicas, tanto as impermeabilizadas (IMP) quanto as porosas (POR), apresentaram temperaturas similares às telhas da cobertura de referência (REF) com uma diferença de  $0,3^{\circ}\text{C}$  e de  $0,5^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, em relação à temperatura média.

Figura 103: Temperatura superficial das telhas nos dias 09 e 10 de dezembro de 2017



A temperatura das telhas das coberturas com isolamento térmico de EPS e com barreira radiante (BR↓) foram maiores do que a temperatura da telha da cobertura de referência (REF) em aproximadamente 5°C e de 5,5°C na temperatura máxima das telhas, respectivamente. As coberturas que apresentaram a temperatura máxima das telhas menores que a cobertura de referência (REF) foram a cobertura com telhas brancas (BRC), 16°C para o horário de pico, e a cobertura verde (VEG) que apresentou redução de 27°C na temperatura máxima.

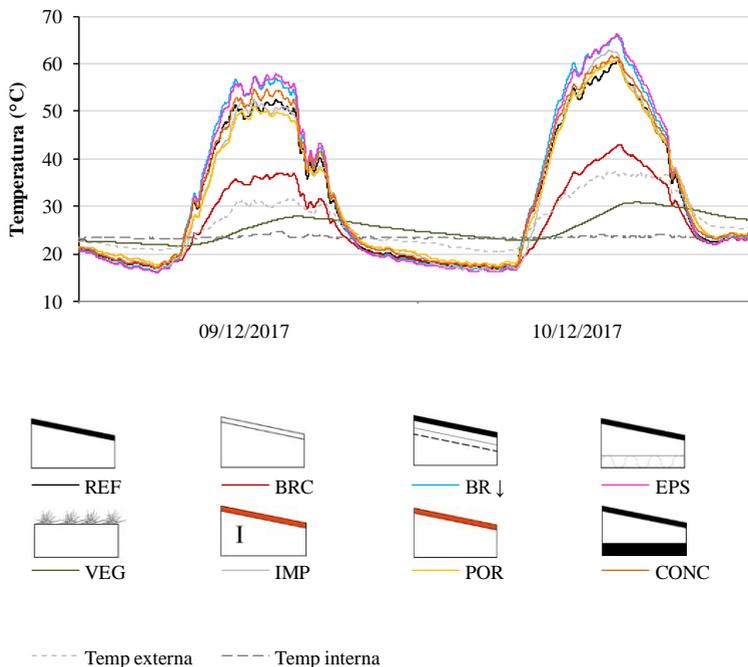
As telhas brancas (BRC) reduziram a temperatura superficial devido ao alto valor de reflexão (0,80) e baixo valor de absorção (0,20) da radiação de onda curta e a cobertura vegetal (VEG) apresentou o menor valor devido ao sombreamento e ao resfriamento evaporativo promovido pela folhas da vegetação utilizada (grama esmeralda, *Zoysa japonica*).

Para as temperaturas superficiais das telhas nos horários com baixa ou sem a incidência de radiação solar, as temperaturas das telhas foram similares entre si, com exceção da cobertura verde. Ou seja, todas apresentaram o mesmo desempenho quando expostas a radiação de onda longa.

A temperatura da face inferior do forro de PVC (REF, BRC, BR↓, EPS, IMP e POR) e da laje de concreto (VEG e CONC) está mostrada na Figura 104. Nas coberturas com telhas cerâmicas impermeáveis (IMP) e porosas (POR) estas temperaturas mostraram-se similares as da cobertura de referência (REF).

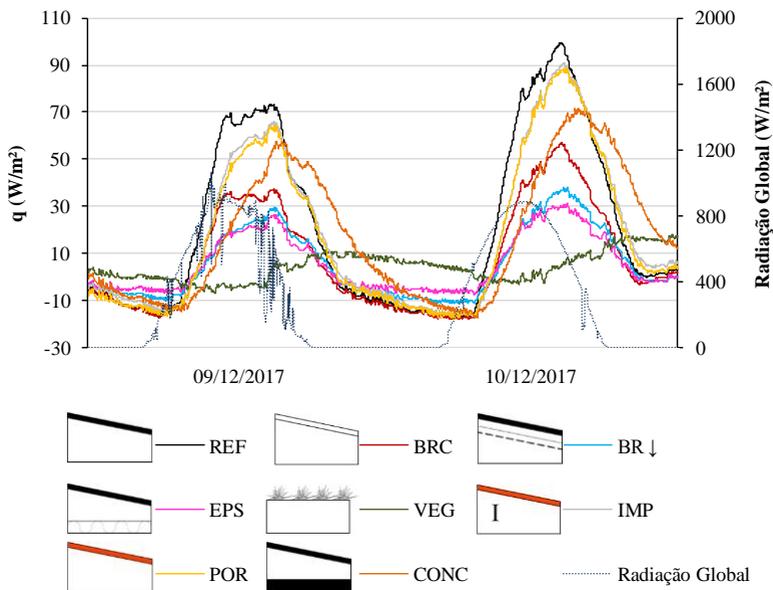
As coberturas com telhas brancas (BRC), com isolamento reflexivo (BR↓) e com isolamento de EPS reduziram a temperatura máxima superficial do forro em 2,8°C, em 3,5°C e em 3,1°C, respectivamente.

Figura 104: Temperatura da superfície inferior do forro nos dias 09 e 10 de dezembro de 2017



O fluxo de calor nas coberturas para os dias 9 e 10 de dezembro de 2017 está mostrado na Figura 105. A cobertura de referência (REF) apresentou o fluxo de calor máximo de  $100 \text{ W/m}^2$  e o mínimo de  $-17 \text{ W/m}^2$ . Todas as coberturas diminuíram a transferência de calor para o interior da banca experimental em relação a cobertura de referência (REF).

Figura 105: Fluxo de calor nas coberturas no decorrer dos dias 09 e 10 de dezembro de 2017



A cobertura com telhas cerâmicas impermeáveis (IMP) e a cobertura com telhas porosas (POR) foram que menos diminuíram a transferência de calor, com um valor médio de 9% e 11%, respectivamente. Esta redução deve-se ao valor da absorvidade para as superfícies das telhas, que para a de fibrocimento é de 0,70 e para as telhas cerâmicas este valor é de 0,52. A cobertura com telhas de fibrocimento e laje de concreto (CONC) reduziu em aproximadamente 25%, e é possível observar o atraso térmico proporcionado pela laje.

As coberturas que mais contribuíram para reduzir a transferência de calor para o interior da bancada foram a cobertura verde (VEG), a com isolamento em EPS, a com isolamento em barreira radiante (BR↓) e a cobertura com telhas brancas (BRC). Para o horário de máximo ganho térmico essas coberturas reduziram em 83%, 66%, 61% e 46% em relação a cobertura de referência.

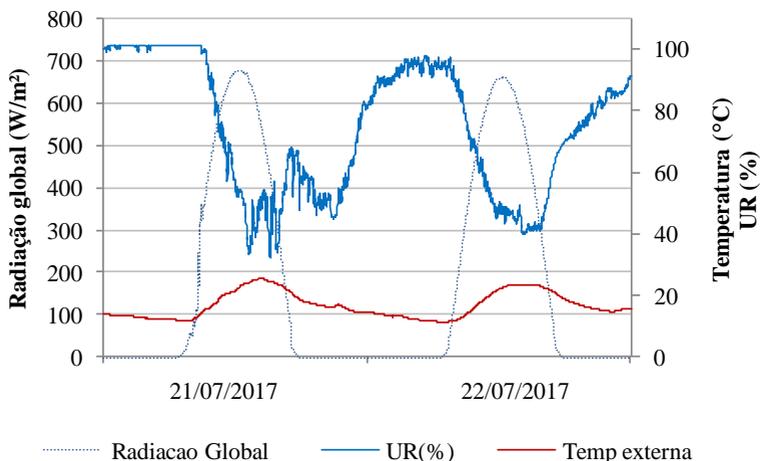
Em relação aos horários de perdas térmicas, as coberturas apresentam diferentes proporções de perdas, porém essas diferenças foram menores quando comparadas aos horários de ganho térmico.

A cobertura com telha branca (BRC), a com telhas cerâmicas impermeáveis (IMP), a com telhas cerâmicas porosas (POR) e a com telhas de fibrocimento e laje de concreto (CONC) apresentaram o valor percentual de perdas térmicas similares ao da cobertura de referência, enquanto que a cobertura verde (VEG) evitou as perdas térmicas em 71%, a cobertura com isolamento de EPS reduziu as perdas em 57% e a cobertura com isolamento por barreira radiante (BR↓) evitou as perdas térmicas em 38%.

### ✓ Período de temperaturas amenas

Os dias escolhidos para mostrar o comportamento térmico das coberturas durante o período de temperaturas amenas foram os dias 21 e 22 de julho de 2017. Nesse período a temperatura mínima foi de 11,3°C e a máxima foi de 25,5°C. Os dois dias foram ensolarados, com radiação solar máxima 680 W/m<sup>2</sup> e umidade relativa média de 75% (Figura 106).

Figura 106: Temperatura externa, umidade relativa e radiação global para os dias 21 e 22 de julho de 2017

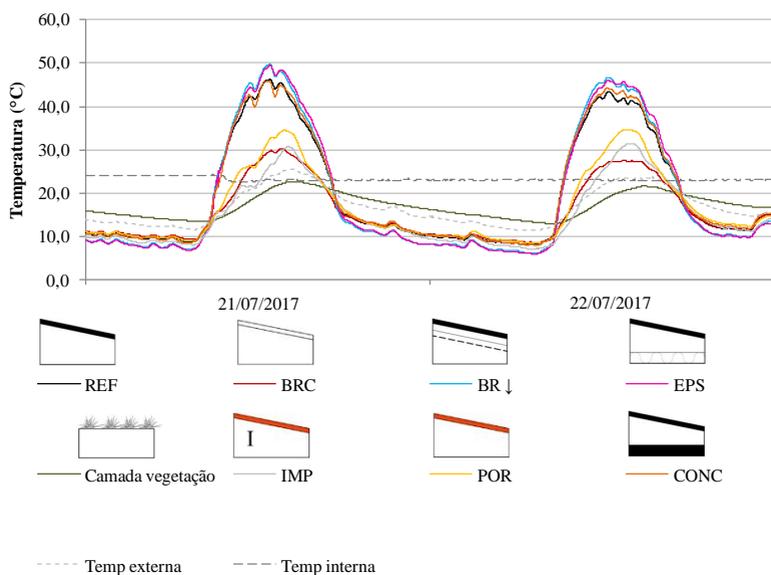


A temperatura superficial das telhas nas coberturas está mostrada na Figura 107. Observou-se que a cobertura com barreira radiante (BR↓) e a cobertura com EPS aumentaram a temperatura máxima das mesmas em 3,5°C e em 2,8°C em relação a cobertura de referência (REF), respectivamente.

A cobertura verde (VEG) e a cobertura com telhas brancas (BRC) continuaram a apresentar as menores temperaturas superficiais, com uma redução de  $22,7^{\circ}\text{C}$  e de  $16^{\circ}\text{C}$  no horário de pico, em relação à cobertura de referência, respectivamente.

A cobertura com telhas de fibrocimento e laje de concreto (CONC) apresentou as temperaturas das telhas similares às de referência (REF). As coberturas com telhas cerâmicas (POR e IMP), que durante o período de temperaturas altas apresentaram as temperaturas das telhas similares a da cobertura de referência, agora apresentaram valores menores. A cobertura com telhas cerâmicas impermeabilizadas (IMP) apresentou uma redução de  $13,7^{\circ}\text{C}$  e a cobertura com telhas cerâmicas porosas (POR) apresentou redução de  $10,3^{\circ}\text{C}$  para o horário de pico. Esta redução é relacionada a dois fatores, um relação a absorvância à radiação solar, que para as telhas cerâmicas é de aproximadamente 0,52 e para a telha de fibrocimento é de aproximadamente 0,70. O outro fator está relacionado à condensação noturna, o que pode ter contribuído para essas telhas terem apresentado menor temperatura do que a cobertura de referência.

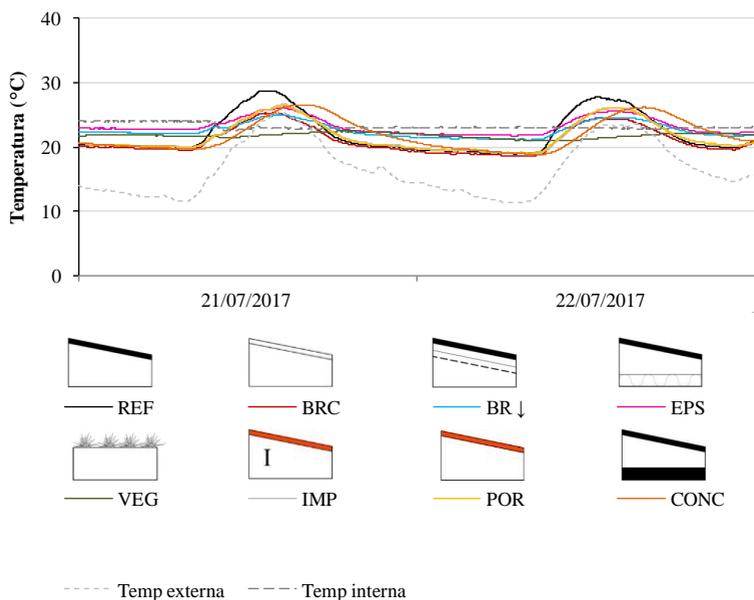
Figura 107: Temperatura superficial das telhas nos dias 21 e 22 de julho de 2017



Ao analisar a temperatura da superfície inferior do forro (Figura 108), verificou-se que as coberturas diminuíram essa temperatura em relação à cobertura de referência (REF) durante os horários de ganho térmico e relação ao período de perda térmica, algumas coberturas aumentaram a temperatura superficial do forro.

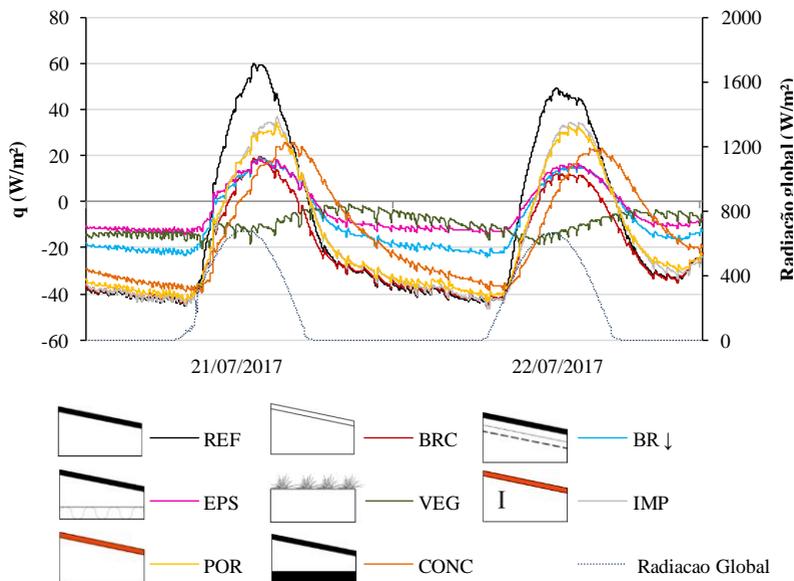
Nos horários de ganho térmico, todas as superfícies do forro apresentaram temperaturas máximas similares de, aproximadamente de 24°C. No período de perdas térmicas, a cobertura com isolamento reflexivo (BR↓), com isolamento em EPS e a cobertura verde (VEG) aumentaram a temperatura do forro em aproximadamente 2°C. As demais coberturas apresentaram temperatura do forro similar à cobertura de referência.

Figura 108: Temperatura superficial do forro nos dias 21 e 22 de julho de 2017



O fluxo de calor está mostrado na Figura 109. A cobertura de referência (REF) apresentou um fluxo de calor entre  $-45 \text{ W/m}^2$  e  $55 \text{ W/m}^2$  durante os dias 21 e 22 de julho de 2017.

Figura 109: Fluxo de calor nas coberturas para os dias 21 e 22 de julho de 2017



Para os períodos de ganho térmico, todas as coberturas reduziram a transferência de calor para o interior da bancada e durante os momentos que houve perda térmica, algumas coberturas diminuíram a transferência de calor para o exterior da bancada e outras apresentaram resultados similares aos da cobertura de referência (REF).

As coberturas com isolamento reflexivo (BR↓) e com EPS diminuíram os ganhos térmicos em aproximadamente 68% para o horário de máximo ganho térmico. Para os horários de máxima perda térmica, a cobertura com barreira radiante (BR↓) evitou a perda de 48% e a cobertura com EPS evitou a perda de calor de 68%.

A cobertura verde (VEG) apresentou fluxo de calor ascendente durante os dois dias, ou seja, perdeu calor para o exterior o período todo. Para o horário de máxima perda térmica, o telhado verde evitou a perda de calor em 57%.

Realizou-se a comparação do desempenho térmico das oito coberturas avaliadas no Estudo 2 tendo como referência a cobertura de telhas de fibrocimento com forro de PVC (REF) para o período de seis meses, de julho a dezembro de 2017, separando-se o sentido de fluxo de calor em ascendente e descendente. A comparação do desempenho

térmico ao considerar o sentido do fluxo ascendente está mostrada na Tabela 9, a qual apresenta a taxa percentual de redução/ganho na transferência de calor através da bancada experimental.

A cobertura verde (VEG) foi a que mais reduziu as perdas térmicas ao longo dos seis meses de medição, com uma proporção de 63%, seguida pela cobertura isolada termicamente com EPS, que reduziu 58% e a cobertura com isolamento térmico reflexivo (BR↓), que reduziu as perdas térmicas em aproximadamente 50%.

As demais coberturas que contribuíram para reduzir as perdas térmicas foram a com telhas de fibrocimento e laje de concreto (CONC) e a com telhas cerâmicas impermeabilizadas (IMP), com proporções médias de 18% e de 11%, respectivamente.

Já a cobertura com telhas de fibrocimento brancas (BRC) e a cobertura com telhas cerâmicas porosas (POR) aumentaram as perdas térmicas em 4% e 2% em média, respectivamente.

Tabela 9: Comparação da eficiência energética para as coberturas para o sentido de fluxo de calor ascendente

Cobertura	Símbolo	Redução na transferência de calor (%)							Média
		Sentido de fluxo de calor ascendente*							
		Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez		
BRC		-8,4	-5,3	-11,3	0,1	4,5	-5,6	-4,3	
BR ↓		55,6	49,6	56,8	64,1	59,5	20,7	51,0	
EPS		67,9	56,7	65,5	62,9	58,0	35,9	57,8	
VEG		50,9	38,3	44,9	70,3	87,6	81,9	62,3	
IMP		-2,3	-2,4	-1,7	8,8	26,9	37,4	11,1	
POR		-0,7	-6,3	2,3	-5,3	7,1	-10,5	-2,2	
CONC		18,8	21,1	22,7	23,5	17,0	3,2	17,7	

\* valores negativos significam aumento nas perdas térmicas

O desempenho térmico para o sentido de fluxo de calor descendente está mostrado na Tabela 11. Para este sentido de fluxo de calor todas as coberturas contribuíram para diminuir o ganho térmico em relação à cobertura de referência (REF).

As coberturas com telhas cerâmicas impermeabilizadas (IMP) e a cobertura com telhas de fibrocimento e laje de concreto (CONC) foram as que menos contribuíram, reduzindo em 25% e 32%, respectivamente, o fluxo de calor para o interior.

A cobertura com telhas cerâmicas porosas (POR) apresentou um desempenho térmico de 35%. O aumento de 10% no desempenho térmico em relação à cobertura com telhas cerâmicas impermeáveis (IMP), decorre da evaporação da água proveniente, principalmente, da chuva.

A cobertura com telhas de fibrocimento brancas (BRC) apresentou uma redução média na transferência de calor em 60%, enquanto que a cobertura com isolamento reflexivo (BR ↓) contribuiu para a diminuição do ganho térmico em 66% e a cobertura isolada termicamente com EPS contribuiu para a redução do ganho térmico em aproximadamente 70%.

Ao comparar o desempenho térmico da cobertura BRC com as coberturas que utilizaram isolamento térmico (BR ↓ ou EPS) observou-se que a mesma apresentou bom desempenho térmico, sendo a diferença máxima no desempenho de aproximadamente 10%. Esta diferença não é considerada grande quando se analisa o custo envolvido, além de que o uso do isolamento térmico aumenta a temperatura superficial das telhas, o que contribuiu para a formação de ilhas de calor, além de submeter a estrutura da cobertura a grandes diferenças de temperatura entre o dia e a noite, o que pode afetar a estanqueidade e a resistência física da cobertura.

As coberturas com isolamento térmico condutivo (EPS) e reflexivo (BR ↓) apresentaram uma diferença média no desempenho térmico de apenas 3% entre elas. A cobertura com barreira radiante de espessura de 0,1 mm apresentou o desempenho térmico similar ao da cobertura com uma placa de poliestireno expandido com espessura de 5 cm. Este resultado mostrou que, quando o fluxo de calor é descendente, a maior troca térmica ocorre por radiação, por essa razão, o isolamento reflexivo (que dificulta a transferência de calor por reflexão de ondas longas) apresentou o desempenho térmico praticamente igual a uma camada de 5 cm de EPS, o qual dificulta a transferência do calor por condução.

A cobertura verde (VEG) apresentou uma redução de 85% no ganho térmico, sendo a cobertura que mais eficaz em diminuir os ganhos térmicos ao longo dos meses. O uso da cobertura verde apresenta outras

vantagens, como a redução das temperaturas superficiais, tanto da laje de concreto quanto da superfície vegetada, redução das ilhas de calor e drenagem das águas pluviais.

Tabela 10: Comparação da eficiência energética para as coberturas para o sentido de fluxo de calor descendente

Cobertura	Símbolo	Redução na transferência de calor (%) Sentido de fluxo de calor descendente						
		Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Média
BRC		74,0	75,7	61,1	50,8	49,9	46,1	59,6
BR ↓		66,4	75,1	65,6	59,6	63,0	67,7	66,2
EPS		67,5	68,8	67,8	69,1	69,5	70,8	68,9
VEG		95,9	98,8	91,9	78,9	76,7	69,1	85,2
IMP		37,9	50,6	23,0	21,3	9,6	6,0	24,7
POR		43,4	58,2	23,5	37,1	20,9	24,8	34,6
CONC		49,2	54,1	24,8	24,9	20,9	18,6	32,1



#### 4. MEDIÇÕES EM UM TELHADO REAL

A edificação escolhida para realizar as medições em um telhado real está localizada na Universidade Federal de Santa Catarina, no Departamento de Manutenção Predial e de Infra-estrutura (DMPI). A Figura 110 mostra a imagem de satélite do local e a distância em relação ao bloco B (onde foi construída a bancada experimental). Os dois prédios estão distantes aproximadamente 350 m um do outro.

A edificação é térrea (Figura 111), com telhado de duas águas em fibrocimento e com forro em gesso. As fachadas principais possuem orientação oeste e leste e há a presença de árvores que projetam sombra em parte de cobertura.

Figura 110: Distância entre a bancada experimental e a edificação em que foram realizadas as medições em escala real

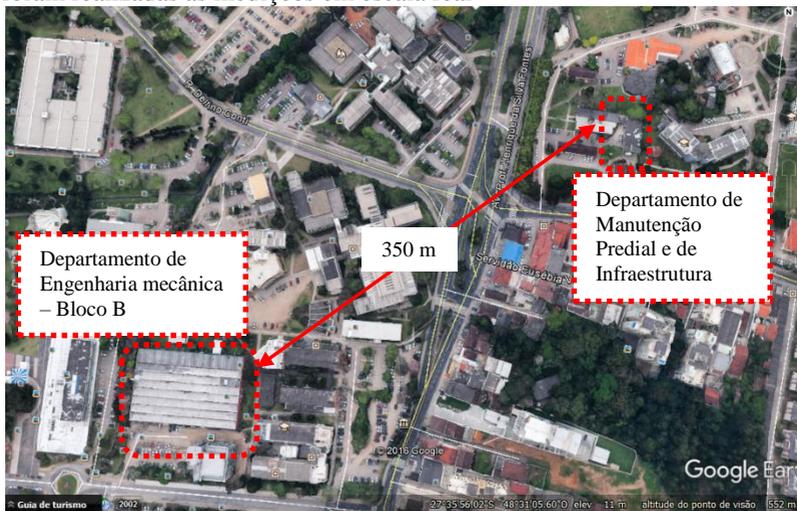


Figura 111: Vista externa do DMPI



#### 4.1 INSTRUMENTAÇÃO DA COBERTURA

A cobertura desta edificação foi instrumentada na parte mais alta do ático por termistores tipo NTC-10K e por transdutores de fluxo de calor por gradiente tangencial com dimensões de 10 x 10 cm, (GÜTHS et al., 1995) (Figura 112 e Figura 113). Os termistores NTC 10K foram utilizados para registrar valores de temperaturas da superfície inferior da telha, do ar no ático, da superfície superior do forro e da temperatura interna do ar (no interior da sala) e os transdutores de fluxo de calor foram instalados na parte superior e inferior do forro. Estes sensores foram conectados a um sistema de transmissão de dados por rádio modelo xBee-PRO 900XCS S3B. Os dados são enviados a cada minuto até a estação de medição, localizada na sala no CB3E, Bloco B do Departamento de Engenharia Mecânica.

A ventilação do ático realizada por meio de cobogós foi vedada através de chapas de polipropileno fixadas na fachada da edificação, sobre os mesmos.

Figura 112: Vista interna do ático da cobertura



Figura 113: Localização dos sensores

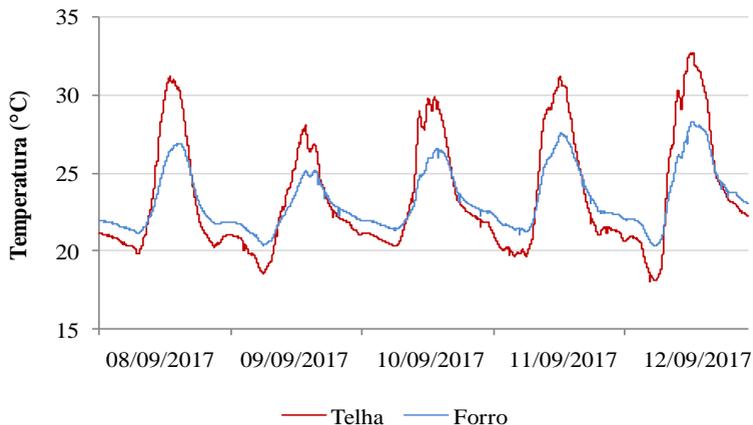


#### 4.2 RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NO TELHADO DE DIMENSÕES REAIS

As medições no telhado real ocorreram de julho a dezembro de 2017 com o objetivo de comparar a resistência térmica do ático desta cobertura com a resistência térmica do ático da cobertura de referência da bancada experimental.

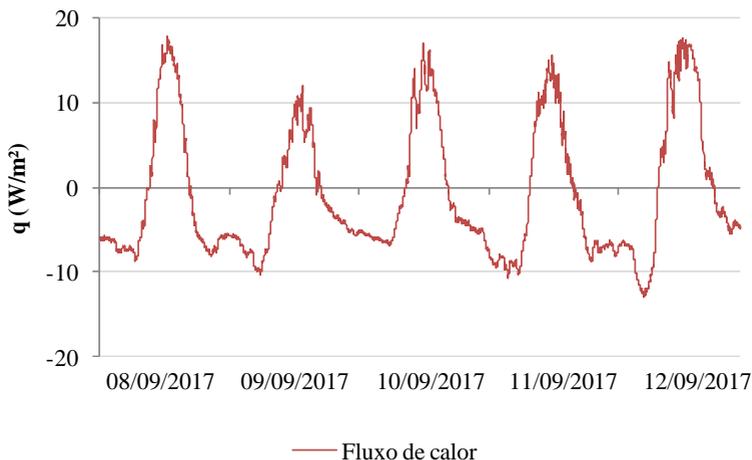
Selecionou-se um período para mostrar as temperaturas superficiais das telhas e do forro na cobertura de dimensões reais, mostradas na Figura 114. A temperatura superficial da telha apresentou valores máximos próximos de  $30^{\circ}\text{C}$  e mínimos próximos de  $20^{\circ}\text{C}$ . A temperatura superficial do forro apresentou valores que variaram de aproximadamente  $19^{\circ}\text{C}$  a  $27^{\circ}\text{C}$ .

Figura 114: Temperaturas superficiais das telhas e do forro (08 a 12 de setembro de 2018)



O fluxo de calor para estes dias apresentou valores que variou de aproximadamente  $-10 \text{ W/m}^2$  a  $19 \text{ W/m}^2$ , conforme a Figura 115.

Figura 115: Fluxo de calor (de 08 a 12 de setembro de 2018)



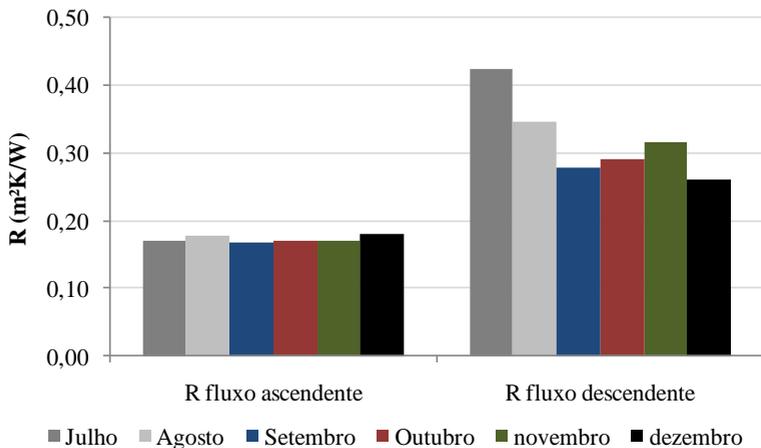
Calculou-se a resistência térmica a cada mês, separando os sentidos de fluxo de calor em ascendente e descendente, cujos resultados estão mostrados na Figura 116.

Para o sentido de fluxo de calor ascendente a resistência térmica variou entre  $0,17\text{m}^2\text{K/W}$  e  $0,18\text{m}^2\text{K/W}$  e calculou-se a resistência térmica para todo o período (de julho a dezembro) de acordo com a ISO 9869 e encontrou-se o valor da resistência térmica de  $0,17\text{m}^2\text{K/W}$ .

A resistência térmica do ático para o sentido de fluxo de calor descendente variou entre  $0,42\text{m}^2\text{K/W}$  e  $0,26\text{m}^2\text{K/W}$ . Essa diferença maior entre as resistências térmicas para o sentido de fluxo de calor descendente pode ser devida a infiltração do ar através das frestas existentes na cobertura, as quais podem afetar as correntes de convecção no ático e isso pode contribuir para alterar o valor da resistência térmica.

A resistência térmica para o período de seis meses (julho a dezembro de 2017), calculada também de acordo com o método sugerido na ISO 9869, foi de  $0,31\text{m}^2\text{K/W}$ .

Figura 116: Resistência térmica por mês para os sentidos de fluxo de calor ascendente e descendente para o ático do telhado de dimensões reais



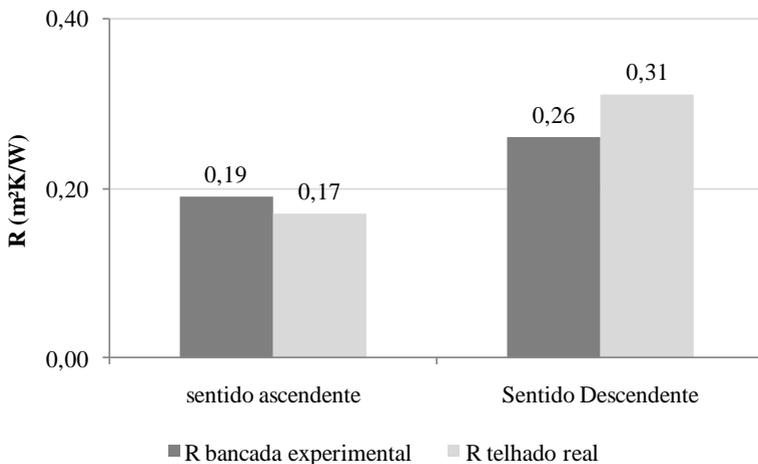
#### 4.2.1 Comparação entre a bancada experimental e o telhado de dimensões reais

A Figura 117 mostra os resultados obtidos de resistência térmica ao longo dos seis meses de medição para a bancada experimental e para o telhado de dimensões reais, separadas em função do sentido de fluxo de calor. Para o sentido de fluxo de calor ascendente verificou-se uma

diferença de 10% entre a bancada experimental e o telhado de dimensões reais e para o sentido de fluxo descendente esta diferença foi de 19%.

As diferenças entre a bancada experimental e o telhado real podem ser relacionadas à infiltração do ar no ático (através das frestas oriundas da ondulação das telhas no telhado real) e à geometria da cobertura, que no telhado real é triangular enquanto que na bancada é trapezoidal.

Figura 117: Comparação entre a resistência térmica da bancada experimental e do telhado real



## 5. SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

Os Códigos de Fluidodinâmica Computacional (CFD – *Computer Fluid Mechanics*) são um ramo da mecânica dos fluidos que recorrem a métodos numéricos e algoritmos para estudar problemas envolvendo fluidos e fenômenos térmicos. O CFD tem emergido como uma ferramenta alternativa para auxiliar a investigação e estudo em diversas áreas. Com o passar dos anos modelos cada vez mais completos e algoritmos mais eficientes foram desenvolvidos.

A possibilidade de manipulação 3D tornou o processo de criação de simulações CFD mais rápido e fácil, permitindo que pesquisadores estudassem a transferência de calor e outros fenômenos físicos com precisão, mesmo em geometrias complexas.

Existem vários métodos de solução diferentes usados em códigos CFD. Os três mais famosos são o método do volume finito (FVM), em que o CFX é baseado; Método de elementos finitos (FEM) e método de diferenças finitas (FDM). Usando FVM, a região de interesse (domínio) é separada em um conjunto de controle de volume. Em seguida, as equações gerais de conservação para massa, momento, energia, entre outras, são separadas em um sistema de equações algébricas, que são resolvidas usando métodos iterativos para cada volume de controle. No final, uma aproximação do valor de cada variável em cada volume pode ser obtida. Assim, é possível ter uma imagem completa do calor e do comportamento de transferência de massa ao longo do domínio. No entanto, boas práticas de simulações devem ser usadas para obter resultados precisos.

Neste trabalho, a simulação computacional tem o objetivo de avaliar o comportamento térmico do ar dentro do espaço do ático, analisando a influência da emitância (0,05 e 0,95) das superfícies, do sentido do fluxo de calor, descendente e ascendente (situação verão e inverno respectivamente), da diferença de temperatura e também da dimensão da base do ático simulando a situação de escala reduzida e dimensão real (0,7 e 5 metros) na resistência térmica desta camada de ar.

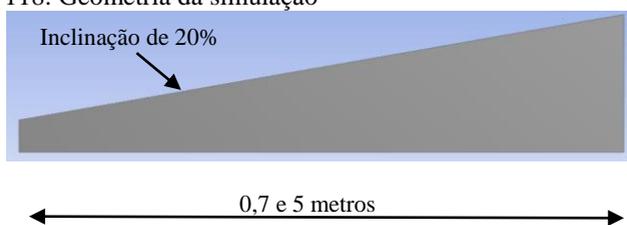
### 5.1 METODOLOGIA CFD

Existem cinco passos que devem ser seguidos para realizar a simulação CFD, que são a criação da geometria, criação da malha, definição do modelo físico, verificação/validação e solução do problema CFD.

### 5.1.1. Criação da geometria

Nesta primeira etapa foram criadas as duas geometrias, com dimensões da base de 0,7 metros e 5 metros, ambas com inclinação de 20%. A primeira geometria é igual à bancada experimental e a segunda visa simular um telhado real. Quando a base é 0,7m o lado esquerdo do trapézio tem uma altura de 0,06 m e o lado direito 0,20m. Quando a base é de 5 metros, a inclinação é mantida e a altura do lado maior aumenta proporcionalmente. A Figura 118, mostra a geometria para as duas situações.

Figura 118: Geometria da simulação

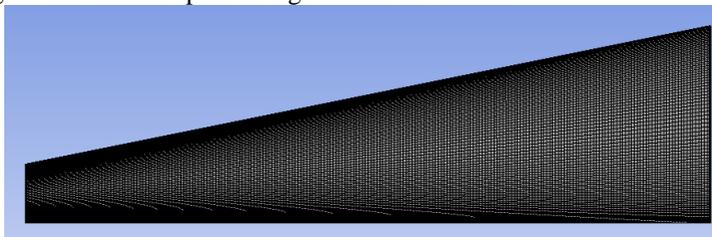


### 5.1.2 Geração da malha

Com o objetivo de validar a malha, alguns testes foram realizados. O primeiro é o chamado teste de malha. Nele, os tamanhos dos elementos foram diminuídos progressivamente até que não houvesse uma diferença significativa nos resultados da simulação provando que o tamanho da malha já não altera mais o resultado obtido. O segundo teste foi feito tendo como base o trabalho de LAM et al. (1989), utilizando a malha do primeiro e testando nas mesmas condições do artigo supracitado e verificou-se que foram obtidas as mesmas conclusões. Logo, para a cavidade trapezoidal proposta, a malha mostrada na Figura 119 consegue reproduzir satisfatoriamente a realidade.

O tamanho base da malha foi de 3 mm. Seguindo recomendações da *ANSYS helping*, os elementos próximos às bordas do sistema estão refinados devido ao grande gradiente de velocidade e fluxo nessas áreas. Foi utilizado um padrão nas faces esquerda e direita do trapézio, de modo que os elementos nos pares superior e inferior tivessem um tamanho 5 vezes menor do que no centro, desse modo garantindo uma malha bastante refinada nas regiões com os maiores gradientes. Adicionalmente, os elementos mais próximos das faces direita e esquerda também foram refinados.

Figura 119: Malha aplicada a geometria do telhado



### 5.1.3 Definições físicas

O próximo passo na simulação é definir os parâmetros da simulação. No Quadro 3 estão especificados os valores utilizados e o tipo de limite entre o volume de controle e o espaço em volta.

Quadro 3: Parâmetros de simulação

Face	Tipo de fronteira	Temperatura Base
Laje	Temperatura constante	23°C
Telhado	Temperatura constante	(23°C - $\Delta T$ ) - Inverno (23°C + $\Delta T$ ) - Verão
Lado esquerdo	Adiabático	-
Lado direito	Simetria	-
Lado da frente	Simetria	-
Lado de trás	Simetria	-

Pelo fato da simulação ter sido feita em apenas duas dimensões, as faces frontal e de trás são simétricas. O lado direito possui uma condição de contorno de parede. O lado esquerdo, pelo fato de ser o menor lado do trapézio e possuir bom isolamento térmico no experimento, foi considerado adiabático, ou seja, não há transmissão de calor por esse lado. A face inferior da geometria (a qual corresponde a face inferior da chapa metálica que está parafusada na laje ou forro de PVC) apresenta a temperatura constante de 23°C. Modificou-se a temperatura da face superior da geometria (a qual corresponde a superfície das telhas na bancada experimental) uma vez que se deseja simular para a condição de verão (fluxo descendente) e para a condição de inverno (fluxo ascendente). A diferença de temperatura estipulada foi de 20°C entre a superfície da laje/forro de PVC e a superfície das telhas. No verão, esta diferença é somada a temperatura do forro e no inverno é subtraída.

## 5.1.4 Solução

Após a definição da física, iniciou-se a solução iterativa do problema. Para a solução convergir, é necessário que o residual RMS (*Root Mean square*) esteja entre  $10^{-4}$  e  $10^{-5}$ . Essa condição é necessária, porém não suficiente, uma vez que os resíduos não podem oscilar muito, o que invalidaria os resultados.

Para cada iteração, um erro é reportado. Quando esse erro tende a um valor baixo, o qual deve ser definido pelo usuário, a solução do problema tende a convergir. Por outro lado, se o erro não se aproxima de um valor aceitável a solução tende a ser divergente.

## 5.2 RESULTADOS DA SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

### 5.2.1 Verificação e Validação (V&V) do modelo CFD

A verificação e validação são formas de verificar a acuracidade e a confiabilidade dos resultados. Um dos órgãos mais respeitados na área de simulação numérica, a AIAA (American Institute of Aerodynamics and Astronautics) (OBERKAMPF; TRUCANO, 2002) definem verificação como: “O processo de determinar que a implementação do modelo represente com exatidão a descrição do modelo conceitual definido pelo desenvolvedor e a solução do modelo”. Nota-se aqui que nada é dito sobre comparação de um modelo físico com o modelo numérico, apenas o modelo numérico com o modelo conceitual (aquele que é composto por toda a informação, modelamento matemático e equações matemáticas que descrevem um sistema físico ou processo (OBERKAMPF; TRUCANO, 2002). Por outro lado, segundo a mesma AIAA a definição de validação é: “O processo de determinar o quanto o modelo é uma representação precisa do mundo real da perspectiva dos usos intencionados do modelo”. Percebe-se aqui que, ao contrário da definição de verificação, validação é uma comparação entre o que ocorre no mundo real e o que ocorre no modelo numérico. Portanto, em outras palavras, verificação certifica que o modelo conceitual está sendo corretamente resolvido pelo código computacional, enquanto que a validação certifica o quão bem o modelo computacional simula a realidade.

Após a definição de verificação e validação e as diferenças entre as duas, ambas as metodologias de desenvolvimento serão desenvolvidas. Em (SLATER, 2008) é apresentado um tutorial sobre como V&V deve ser feito. No Quadro 4 é apresentada essa metodologia resumida. Todos

os itens apresentados foram levados em consideração no processo de V&V.

Quadro 4: Resumo da metodologia encontrada em (SLATER, 2008)

<b>Verificação</b>	<b>Validação</b>
Convergência iterativa	Convergência iterativa
Consistência	Consistência
Convergência da malha	Convergência da malha
Convergência temporal	Convergência temporal
Comparar os resultados com soluções com grande exatidão	Comparar os resultados com dados experimentais

## 5.2.2 Verificação dos modos de transmissão de calor

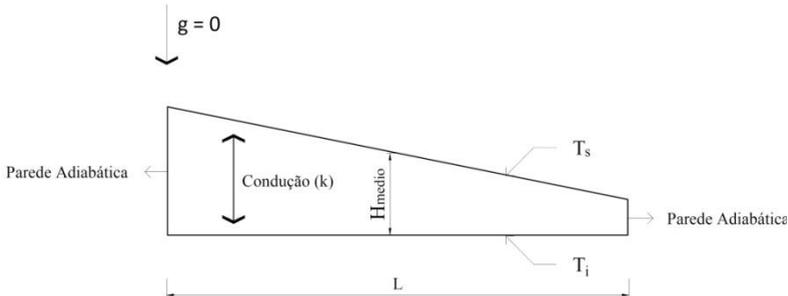
Nesta seção serão realizadas as verificações do modelo, ou seja, conforme explicado anteriormente, a comparação entre os resultados da simulação e analíticos. O presente trabalho será dividido pelos processos de transmissão de calor que tem efeito significativo na resistência térmica total: condução, convecção e radiação. Para cada um desses modos de transmissão de calor será realizado o cálculo dos valores do fluxo de calor e de resistência térmica de forma analítica e numérica para depois compará-los.

Nesta seção todas as simulações realizadas foram feitas considerando uma diferença de temperatura constante de 20°C entre as telhas e a laje, simulando a situação de inverno (temperatura superior menor que a inferior), com emissividade de todas as paredes com 0,95, com condição de contorno na superfície direita de parede.

### 5.2.2.1 Condução

Inicialmente, será calculada a parcela do calor transferida por condução. Na Figura 120 pode ser visto o desenho esquemático utilizado para os cálculos dessa seção (tanto analítico como numérico).

Figura 120: Modelo teórico utilizado para a verificação da condução



Para o cálculo analítico da condução em cavidades trapezoidais, faz-se necessário primeiro o cálculo da condução em cavidades retangulares. De acordo com INCROPERA e DEWITT (2008), o fluxo de calor por condução pode ser calculado pela expressão:

$$\dot{q}_{cond} = \frac{k \Delta T}{H} \quad (25)$$

onde:

$\dot{q}_{cond}$  = Densidade de transferência de calor por condução (W/m<sup>2</sup>);

$k$  = Condutividade térmica (W/mK);

$\Delta T$  = diferença de temperatura (K);

$H$  = Altura média da cavidade (m).

Porém, esse resultado é válido apenas para cavidades retangulares. LAM et al (1989) desenvolveram uma expressão através de testes experimentais que correlaciona a transmissão de calor por condução em uma cavidade retangular e em uma trapezoidal:

$$\dot{q}_{cond\theta} = \dot{q}_{cond} 0.995 \left( \frac{1 - \cos \theta_{max}}{\cos \theta - \cos \theta_{max}} \right)^{0.382} \quad (26)$$

onde:

$\dot{q}_{cond\theta}$  = Fluxo de calor condutivo no trapézio;

$\dot{q}_{cond}$  = Fluxo de calor condutivo no retângulo;

$\theta$  = Ângulo entre a horizontal e a superfície superior;

$\theta_{max}$  = Máximo ângulo entre a horizontal e a superfície superior (quando o trapézio se torna um triângulo).

Foi realizada uma simulação sem nenhum modelo de radiação, considerando uma aceleração da gravidade igual a 0 m/s (para não existir movimento do fluido devido às diferenças de densidade). Como simplificações foram consideradas temperaturas constantes no telhado e na laje e condições adiabáticas nas laterais. Os resultados da simulação foram comparados com resultados analíticos e podem ser visualizados na Tabela 11.

Tabela 11: Verificação do modelo condutivo

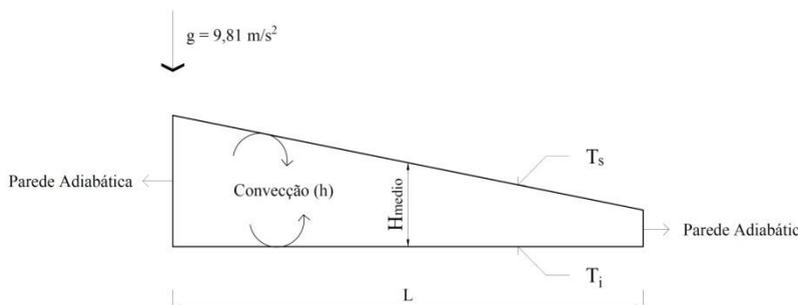
	Comprimento da base (m)	
	0,70	5
Fluxo de calor teórico retangular ( $W/m^2$ )	3,89	0,51
Fluxo de calor teórico trapezoidal ( $W/m^2$ )	4,46	0,59
Fluxo de calor numérico trapezoidal ( $W/m^2$ )	4,53	0,59
Diferença entre teórico e numérico (%)	1,5	0

A análise dos resultados apresentados acima mostrou uma boa concordância entre os modelos teóricos e numéricos. Por esse motivo, o modelo de condução foi considerado bom o suficiente para essa aplicação.

### 5.2.2.2 Convecção

Depois da verificação da condução foi realizada a da convecção. Na Figura 121 pode ser visto um desenho esquemático utilizado para os cálculos nessa seção.

Figura 121: Modelo teórico utilizado para a verificação da convecção



Semelhante à condução, na convecção primeiramente será realizado cálculos analíticos para cavidades retangulares. ÖZİŞIK (1985) definiu uma expressão, obtida a partir de dados experimentais para o número de Nusselt médio em uma cavidade retangular fechada para um número de Rayleigh baseado na altura entre  $3 \times 10^5$  e  $7 \times 10^9$ :

$$\overline{Nu}_H = 1 + 1,44 \left( 1 - \frac{1708}{Ra_H} \right) + \left[ \left( \frac{Ra_H}{5830} \right)^{\frac{1}{3}} - 1 \right] \quad (27)$$

onde:

$\overline{Nu}_H$  = Número de Nusselt médio na cavidade;

$Ra_H$  = Número de Rayleigh baseado na altura média da cavidade.

A partir do número de Nusselt pode ser obtido o fluxo de calor por convecção através da expressão abaixo (INCROPERA; DEWITT, 2008):

$$\overline{Nu}_H = \frac{\dot{q}_{conv}}{\dot{q}_{cond}} \quad (28)$$

onde:

$\dot{q}_{conv}$  = Fluxo de calor convectivo no retângulo (W/m<sup>2</sup>);

$\dot{q}_{cond}$  = Fluxo de calor condutivo no retângulo (W/m<sup>2</sup>).

Na Tabela 12 o valor do fluxo de calor por convecção para a cavidade retangular encontrada por alguns autores e com a simulação realizada. A mesma foi realizada sem nenhum modelo de radiação, porém desta vez com a gravidade no eixo Y com  $g = -9,81 \text{ m/s}^2$ . Como simplificação considerou-se temperaturas constantes nas telhas e na laje e condições adiabáticas nas laterais. Aquelas células marcadas com um traço não estão definidas para o número de Rayleigh no caso de 5 metros.

Tabela 12: Comparação das expressões de vários autores e a simulação realizada para cavidade retangular

	<b>0,7 metros</b> <b>[W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>5 metros</b> <b>[W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Erro para</b> <b>simulação 0,7</b> <b>metros (%)</b>	<b>Erro para</b> <b>simulação 5</b> <b>metros (%)</b>
ÖZİŞİK (1985)	42,8	38,0	-0,4	-3,3
TIWARI e LAWRENCE (1992)	42,8	38,0	-0,4	-3,3
INABA (1984)	50,0	-	13,9	-
LAM et al (1989)	47,9	-	10,2	-
TIWARI et al (1997)	50,3	50,3	14,4	22,0
Simulação	43,0	39,2	-	-

Pela análise da comparação, percebeu-se que mesmo para o caso mais simples da convecção natural em cavidades fechadas, em cavidade retangular com quatro faces adiabáticas, face superior e inferior com temperaturas constantes, diferentes autores divergem muito nos resultados. A única expressão que foi determinada a partir de cavidades retangulares é a de ÖZİŞİK (1985), portanto considerou-se essa expressão como a mais precisa. Conforme pode ser visto na Tabela 13, os resultados da simulação tanto para o caso de 0,7 metros quanto para o caso de 5 metros estão em boa concordância com os resultados de ÖZİŞİK (1985) logo os resultados foram considerados bons o suficiente para dar continuidade ao trabalho.

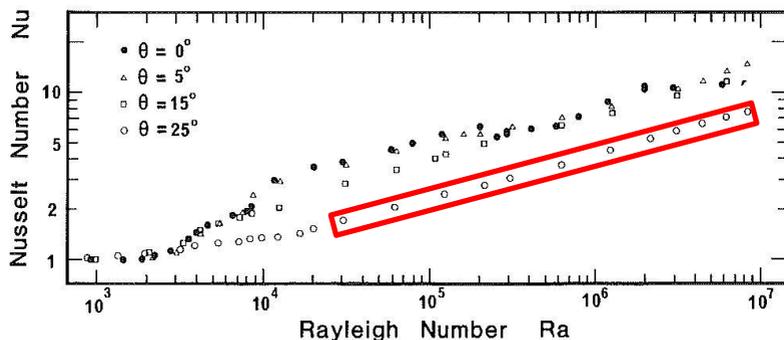
Para cavidades trapezoidais, vários estudos foram feitos de forma a obter relações para o número de Nusselt médio com base no ângulo da superfície superior e o número de Rayleigh. Os cálculos teóricos feitos com base nessas expressões podem ser vistos na Tabela 13. Os resultados do fluxo de calor por convecção da simulação foram comparados com os resultados do fluxo de calor por convecção analíticos para as duas condições a serem estudadas e podem ser visualizados na Tabela 13.

Tabela 13: Comparação das expressões de vários autores e a simulação realizada para cavidade trapezoidal

	<b>0,7 metros [W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>5 metros [W/m<sup>2</sup>]</b>	<b>Erro para simulação 0,7 metros (%)</b>	<b>Erro para simulação 5 metros (%)</b>
TIWARI e LAWRENCE (1992)	48,8	43,5	8,5	5,5
INABA (1984)	56,9	-	21,6	-
LAM et al (1989)	50,8	-	12,2	-
TIWARI et al. (1997)	57,4	57,8	22,3	28,8
HAMMAMI et al (2007)	51,1	-	12,6	-
Simulação	44,6	41,1	-	-

Percebeu-se novamente a variação nos resultados de acordo com diferentes autores. A expressão que mais se aproxima da situação do presente trabalho é a de LAM et al (1989), indicada para cavidades trapezoidais e ar como fluido. Apesar de a simulação ter uma diferença significativa em relação a essa expressão, ela foi obtida a partir de experimentos que devido às incertezas dos equipamentos já possui um erro intrínseco de 6,9%, segundo o próprio autor. Além disso, alguns resultados mostraram divergências, acima do erro intrínseco, da expressão utilizada acima. Isso ocorreu devido a dois fatores, o primeiro foi a mudança do número de células convectivas, que segundo o autor pode introduzir um erro de aproximadamente 10% no número de Nusselt e o segundo pode ser visto na Figura 122. Um dos grupos de dados ( $\Theta=25^\circ$ ) apresentou um comportamento diferente, apresentando número de Nusselt médios aproximadamente 25% menores em grandes números de Rayleigh.

Figura 122: Gráfico mostrando as divergências nos resultados



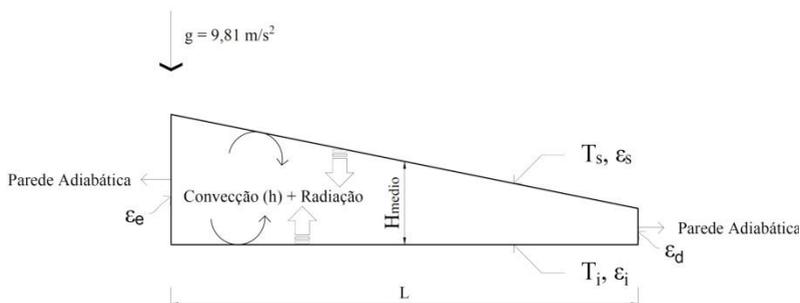
Fonte: (LAM et al., 1989)

Adicionalmente, a simulação apresentou um comportamento semelhante à equação analítica e praticamente o mesmo erro apresentado na cavidade retangular. Contando com todos esses fatores, além da boa concordância da cavidade retangular, os resultados da simulação foram considerados bons o suficiente para a continuação do trabalho.

### 5.2.2.3 Radiação

O último modo de transmissão de calor a ser verificado é a radiação. Na Figura 123 pode ser visto um desenho esquemático utilizado para os cálculos nessa seção.

Figura 123: Modelo esquemático da verificação da radiação



Não foi encontrado nenhum modelo de radiação analítico para cavidades trapezoidais, portanto a verificação será realizada para o

modelo retangular. Segundo INCROPERA e DEWITT (2008), pelo fato de possuir um ângulo de inclinação baixo, esse fato não deve introduzir muitos erros. A simulação foi realizada com as mesmas condições da anterior com a única diferença sendo o cálculo da radiação através do modelo *Discrete Transfer* presente no *CFX*. A comparação entre a simulação realizada e os cálculos teóricos pode ser vista na Tabela 14.

Tabela 14: Verificação do modelo radiativo

Comprimento da base	Fluxo de calor [W/m <sup>2</sup> ]		Erro para a simulação (%)
	Simulação	Teórico	
0,7 metros	Simulação	93,5	-
	Teórico	88,9	4,9
5 metros	Simulação	93,0	-
	Teórico	88,4	4,9

Apesar da comparação entre um modelo trapezoidal e um retangular, a análise dos resultados apresentados acima mostrou uma boa concordância entre os modelos teóricos e numéricos. Por esse motivo, o modelo de radiação foi considerado bom o suficiente para a continuação do trabalho.

### 5.2.3 Verificação da condição de temperatura constante

As condições estabelecidas nas superfícies superior e inferior nas simulações acima foram a de temperatura constante. Porém, não é a condição encontrada em telhados reais, pois nos mesmos há convecção forçada na parte externa da superfície superior (ventos) além de radiação solar incidente. Então, a pergunta que surge: é válido simplificar o problema com convecção e radiação solar para um problema com temperatura constante?

Para responder essa pergunta, foram realizadas duas simulações. Uma para o caso inverno apenas com convecção externa na superfície superior sem a presença de radiação solar. O motivo para tanto, é que no Brasil a situação de inverno (exterior com uma temperatura inferior ao interior da residência) acontece na maior parte das vezes no período noturno. A outra é para a situação de verão com a incidência de radiação externa na superfície superior. Essa situação simula as condições encontradas durante o dia na maior parte das residências brasileiras.

As simulações foram realizadas com a superfície inferior da cavidade trapezoidal a temperatura constante de 23°C, as superfícies laterais adiabáticas e todas as superfícies internas com uma emissividade

de 0,95. A intensidade da radiação e do coeficiente de transmissão de calor por convecção externa foi escolhida de forma que temperatura da superfície superior tivesse uma diferença de temperatura para a superfície inferior de aproximadamente  $20^{\circ}\text{C}$ , de forma a facilitar a comparação. Na Figura 124 podem ser visto o perfil de temperaturas na superfície superior para o caso com radiação incidente.

Na Tabela 15 é comparada a resistência térmica obtida para a condição de temperatura constante na situação verão e para a condição com radiação incidente.

Figura 124: Distribuição de temperaturas no telhado para o caso apenas com incidência de radiação

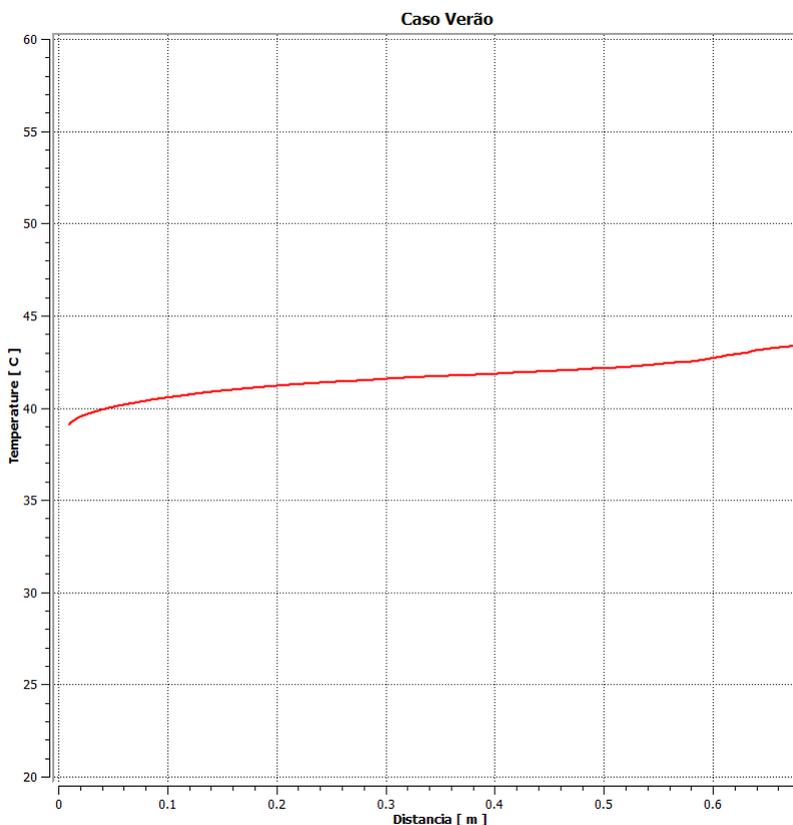
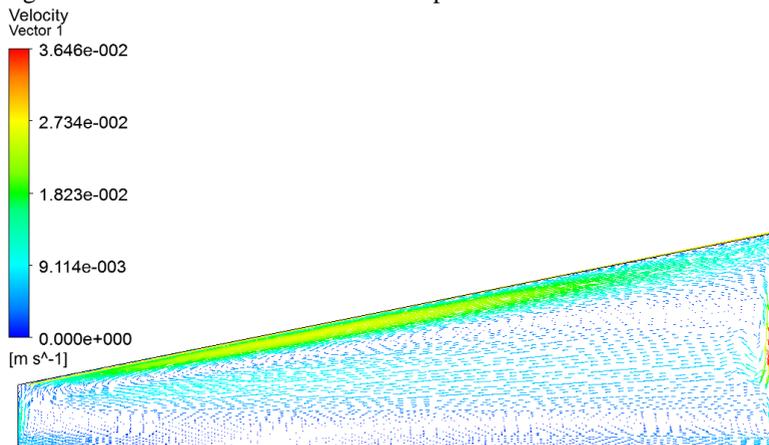


Tabela 15: Comparação dos casos com radiação e verão com temperatura constante

	<b>Resistência térmica total</b> [K.m <sup>2</sup> /W]	<b>Diferença (%)</b>
<b>Caso com radiação</b>	2,678	0,04
Caso verão com temperatura constante	2,677	-

A análise Figura 124 mostrou que para o caso com radiação incidente há distribuição de temperaturas moderada (variação máxima de 5°C) além de um padrão de distribuição linear, sem a variação brusca no fluxo de calor por toda a área da superfície superior. O motivo para tanto é o padrão de movimento do ar no interior da cavidade (conforme pode ser visto na Figura 125) o que faz o coeficiente de transmissão de calor por convecção não variar muito localmente, causando baixa variação na temperatura. Adicionalmente, para o caso com radiação, os valores das resistências térmicas ficaram bem próximos, com erro considerado irrisório. Portanto, foi considerado que, para o caso verão, a simplificação de considerar a superfície superior com uma temperatura constante é válida.

Figura 125: Padrão de movimento do ar para o verão



Na Figura 126 pode ser visto o perfil de temperatura na superfície superior para o caso com convecção externa. Na Tabela 16 é comparada

a resistência térmica total obtida para os casos com convecção externa e inverno com temperatura constante.

Figura 126: Distribuição de temperaturas no telhado para o caso apenas com convecção externa

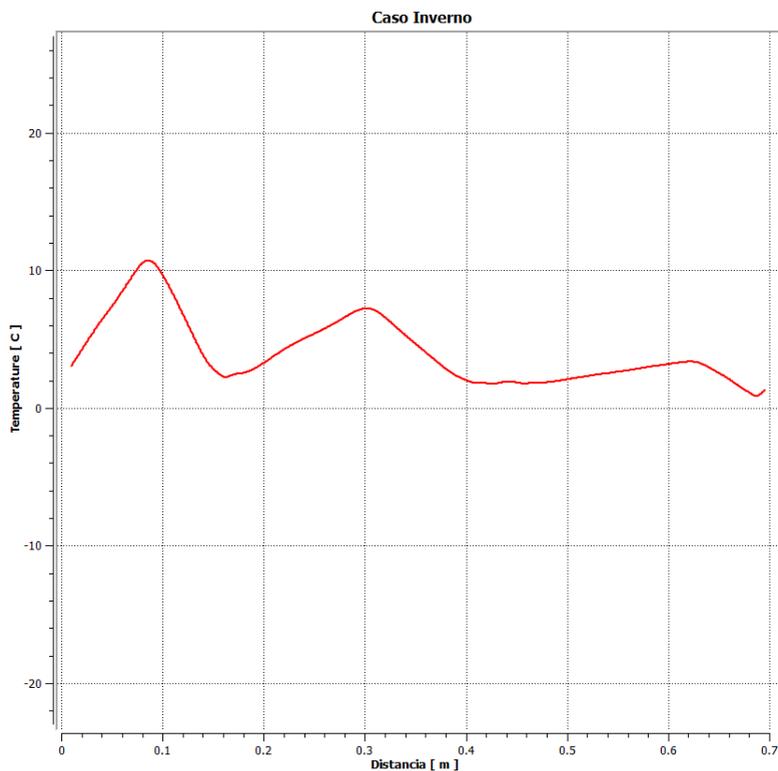


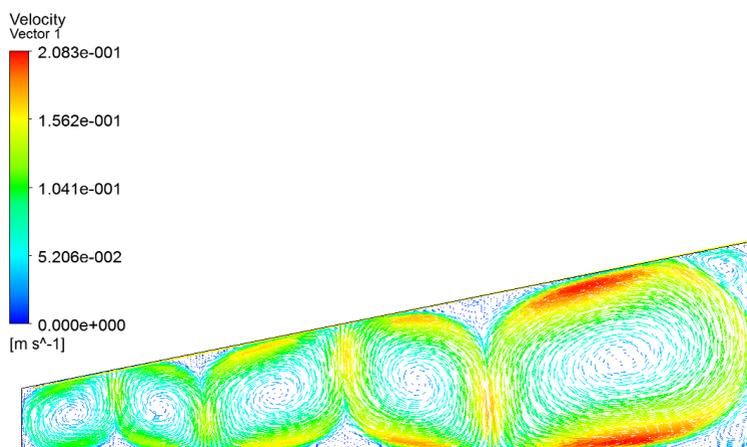
Tabela 16 - Comparação dos casos com convecção externa e inverno com temperatura constante

	Resistência térmica total [K.m <sup>2</sup> /W]	Diferença (%)
Caso com convecção externa	0,437	2,45
Caso inverno com temperatura constante	0,448	-

Para o caso com convecção externa, a análise da Figura 126 mostrou uma variação maior da temperatura ao longo da superfície

superior (variação máxima de  $10^{\circ}\text{C}$ ) além de um padrão de distribuição não linear, o que causa a variação brusca no fluxo de calor sobre a superfície superior. O motivo para tanto é o padrão de células convectivas formadas pelo movimento do ar no interior da cavidade (Figura 127), o que faz variar o coeficiente de transmissão de calor por convecção localmente, causando grande variação na temperatura. Apesar desse fato, a resistência térmica da cavidade ficou bem próxima da condição com temperatura constante. Portanto, foi considerado que, para o caso inverno, a simplificação de considerar a superfície superior com uma temperatura constante é válida.

Figura 127: Padrão das células convectivas para o inverno



#### 5.2.4 Análise da influência da escala

Os estudos realizados para cavidades trapezoidais analisaram alguns aspectos da transferência de calor, como a influência da razão de aspecto (divisão entre o comprimento da superfície inferior e a altura média da cavidade), o número de Rayleigh e o ângulo de inclinação. Entretanto, nenhum desses estudos avaliou o efeito da escala do telhado, ou seja, existe a dúvida se duas cavidades trapezoidais, uma com comprimento de base de 0,7 metros e outra com 5 metros, com a mesma diferença de temperatura, o mesmo ângulo de inclinação e mesma razão de aspecto apresentarão o mesmo comportamento térmico. Para tanto, realizou-se um estudo teórico sobre o tema com a finalidade de descobrir

a resposta para essa questão e razões teóricas. Em seguida, serão apresentadas duas simulações numéricas com o objetivo de analisar o problema.

A comparação feita entre os resultados para o número de Nusselt médio calculado segundo as diversas expressões mostrada na Tabela 13 apontou que há divergência entre os autores se há uma influência da escala no número de Nusselt médio. Para cavidades retangulares, HOLLANDS et al (1975) e GLOBE et al (1959), concluíram em seus trabalhos que o número de Nusselt médio é proporcional à raiz cúbica do número de Rayleigh. Para cavidades inclinadas OZOE et al (1975) e para cavidades trapezoidais TIWARI et al. (1997) chegaram à mesma conclusão. Como o número de Rayleigh depende da altura média da cavidade ao cubo, no final o número de Nusselt médio depende da altura média da cavidade elevada à primeira potência. Adicionalmente, conforme mostra a equação 25, o fluxo de calor por condução é proporcional ao inverso da altura média. Dessa maneira, quando aplicada a equação 28 o fluxo de calor por convecção não será dependente da altura média. Resumidamente, se o Número de Nusselt médio da cavidade for proporcional à raiz cúbica do Número de Rayleigh, o fluxo de calor convectivo não será dependente da altura média.

Entretanto, outros autores concluíram que o número de Nusselt médio da cavidade não é proporcional à raiz cúbica do número de Rayleigh. Por exemplo, LAM et al. (1989) concluíram que o número de Nusselt médio na cavidade é proporcional ao número de Rayleigh elevado à 0,278 e HAMMAMI et al. (2007) é proporcional à raiz quarta do número de Rayleigh. Portanto, não há uma concordância entre os estudiosos da área sobre o efeito da escala no número de Nusselt médio na cavidade. Logo, será realizado um estudo numérico sobre o efeito da escala sobre a resistência térmica total na cavidade.

#### 5.2.4.1 Simulação numérica

Conforme descrito acima, foram realizadas algumas simulações com mesmas condições de contorno, com a única diferença sendo a escala do trapézio, um com 0,7 metros e outro com 5 metros de comprimento de base. As simulações foram feitas com temperaturas constantes nas superfícies superior e inferior e com uma diferença de temperatura de 20°C. A Tabela 17 mostra a resistência térmica de convecção e total (convecção + radiação) para o sentido de fluxo de calor ascendente.

Tabela 17: Resistência térmica em função da escala (sentido de fluxo ascendente)

<b>Escala/ Dimensão</b>	<b>Resistência térmica Convectiva [m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>Resistência térmica Total [m<sup>2</sup>K/W] (conv+ rad)</b>	<b>Diferença Convectivo (%)</b>	<b>Diferença - Total (%)</b>
0,7 metros	0,448	0,151	-	-
5 metros	0,491	0,156	9,60	3,31

Percebeu-se que a diferença entre os dois casos para a transmissão de calor unicamente por convecção é considerável, aproximando os 10%. Na Tabela 13, com o cálculo teórico desse problema e boa parte das referências estudadas apresentou a mesma tendência de aumento da resistência térmica convectiva conforme a escala cresce.

O desvio entre as resistências térmicas convectivas dos dois casos pode ser explicado pelo motivo de que, para o caso de 5 metros, o escoamento já é turbulento. Segundo O'TOOLE e SILVERSTON (1961), o número de Nusselt médio em uma cavidade retangular é proporcional ao número de Rayleigh elevado a 0,305 em sua zona turbulenta, o que implica em uma diminuição do fluxo de calor por convecção conforme a escala aumenta, justamente a tendência observada.

Com relação à resistência térmica total (convecção + radiação), a diferença se mostrou ser consideravelmente menor, de 3,3%. Os cálculos teóricos realizados também demonstraram a mesma tendência, de aumento da resistência térmica total conforme a escala aumenta, porém em um nível menor. O motivo para tal fenômeno é o fato de haver aproximadamente duas vezes mais transferência de calor por radiação do que por convecção. A resistência radiativa varia menos que a convectiva, de modo a amortizar o erro da parte convectiva na resistência térmica total.

A tabela 18 mostra os resultados de resistência térmica para o sentido de fluxo de calor descendente. Observou-se que a resistência térmica convectiva apresentou valores mais elevados quando comparados com os resultados obtidos para o sentido de fluxo ascendente. Decorre do fato de que, quando o sentido de fluxo de calor é descendente, o ar dentro da cavidade tende a apresentar pouca velocidade, o que reduz as trocas de calor por convecção (e aumenta o valor da resistência térmica convectiva). Quando se analisa a resistência térmica total, a resistência

térmica convectiva apresentou pouca influência neste valor. A razão para este fato é que as trocas de calor por radiação são predominantes.

Comparando-se a resistência térmica total em função da escala, verificou-se que esta exerceu pouca influência na resistência térmica total, sendo de 0,17 m<sup>2</sup>K/W para o caso de 0,70 m de base e de 0,16 m<sup>2</sup>K/W para o caso de 5 m de base.

Tabela 18: Resistência térmica em função da escala (sentido de fluxo descendente)

<b>Escala/ Dimensão</b>	<b>Resistência térmica Convectiva [m<sup>2</sup>K/W]</b>	<b>Resistência térmica Total [m<sup>2</sup>K/W] (conv+ rad)</b>	<b>Diferença Convectivo (%)</b>	<b>Diferença - Total (%)</b>
0,7 metros	2,70	0,17	-	-
5 metros	3,13	0,16	86	6,3

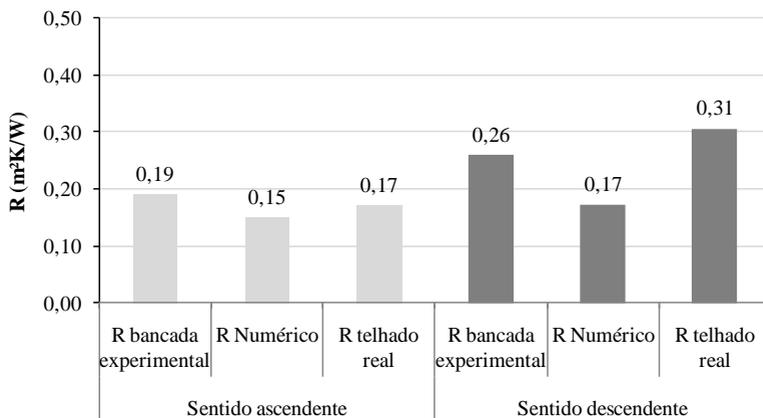
Portanto, foi considerado que a escala não possui uma influência significativa na resistência térmica total. Esse resultado seria um indicativo que o estudo de transferência de calor nesse tipo de cavidade poderia ser realizado em escala, ou seja, os telhados reais poderiam ser avaliados com baixo erro para bancadas em escala reduzida.

### 5.2.5 Comparação numérico experimental

Com a finalidade de verificar se bancada experimental condiz com uma situação real de uma cobertura, comparou-se os resultados obtidos para a cobertura 1 (bancada experimental) com os resultados obtidos através das medições realizadas no telhado de dimensões reais e com os resultados da simulação computacional.

A Figura 128 mostra a comparação das resistências térmicas para os sentidos de fluxo de calor ascendente e descendente, obtidas através da bancada experimental, das medições no telhado de dimensões reais e através da simulação computacional.

Figura 128: Comparação numérica e experimental de R total



Para o sentido de fluxo de calor ascendente, a resistência térmica obtida por meio das medições na bancada experimental, da simulação computacional e das medições no telhado de dimensões reais foi de 0,19 m²K/W, de 0,15 m²K/W e de 0,17 m²K/W, respectivamente. A diferença entre as resistências térmicas obtidas entre o ático do telhado real e o ático da bancada experimental foi de 11% e entre a bancada experimental e a simulação computacional foi de 21%.

Já para o sentido de fluxo de calor descendente, as diferenças foram maiores. Entre a simulação e a bancada experimental a diferença foi de 35% e entre o telhado real e a bancada chegou a 19%.

As razões para a diferença entre os resultados da bancada experimental e da simulação podem estar associadas à fuga de calor pelas superfícies laterais do ático, uma vez que no modelo simulado não há troca de calor por essas superfícies (consideradas adiabáticas), e isso acarreta redução no fluxo e aumento na resistência térmica. Outra razão pode estar relacionada à medição local do fluxo de calor (região central) e não à média de toda a superfície do forro. Apesar de ter sido colocado uma chapa metálica para homogeneizar o fluxo de calor, pode ainda haver alguma não homogeneidade nessa grandeza.

As possíveis causas para a diferença entre a bancada experimental e o telhado real podem estar associadas à infiltração do ar no ático (através das frestas oriundas da ondulação das telhas no telhado real), e à geometria da cobertura, que no telhado real é triangular enquanto

que na bancada é trapezoidal, o que pode acarretar alterações nas trocas de calor por convecção.



## 6. ANÁLISE COMPLEMENTAR EM UM CONDUTIVÍMETRO TÉRMICO E COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS

Os ensaios em laboratório foram realizados no condutivímetro térmico marca Laser Comp modelo FOX-314 com área de medição de 30 x 30 cm e abertura máxima de 1,5 cm, conforme mostrado na Figura 129. Este equipamento segue a norma ASTM C-518.

Figura 129: FOX-314 (Laser Comp)



Para avaliar a influência da presença de um material de baixa emissividade na resistência térmica do ar instalou-se o isolamento reflexivo entre dois quadros de poliestireno expandido, conforme a Figura 130. Cada quadro possui a dimensão de 30 cm por 30 cm, vazado e com uma borda de espessura 2,5 cm. A altura do mesmo é de 2,5 cm.

Através deste equipamento é obtida a condutividade térmica para os casos testados, sendo possível calcular a resistência térmica pela Equação 59.

$$R = \frac{e}{k} \quad (59)$$

onde:

e = espessura (m);

k = condutividade térmica ( $\frac{W}{mK}$ ).

Figura 130: Quadros em EPS (sem e com isolamento)



Os ensaios foram realizados variando a diferença de temperatura entre as placas quente e fria. O Quadro 5 mostra os casos avaliados, para uma diferença de temperatura entre a placa quente e a fria de 15°C, 25°C e de -15°C, simulando fluxo de calor sentido descendente e ascendente.

Quadro 5: Configurações testadas no condutímetro térmico

	<b>Espessura da cavidade de ar (m)</b>
Sem isolamento	0,05
Com barreira radiante	2 x 0,025
Com EPS (espessura=0,01 m)	0,04

## 6.1 MODELO MATEMÁTICO

O modelo matemático para calcular a transferência de calor em coberturas foi desenvolvido considerando cavidades de ar retangulares e trapezoidais.

Para cavidades retangulares foram desenvolvidas equações para dois sentidos de fluxo de calor, ascendente e descendente, para cavidades planas, com e sem a presença de isolamento térmico por reflexão, considerando o fluxo de calor unidirecional.

Para cavidades trapezoidais foram desenvolvidas as equações para fluxo de calor ascendente, sem isolamento térmico.

## 6.2 CAVIDADE PLANA HORIZONTAL

O cálculo da resistência térmica em cavidade de ar horizontal dividiu-se em dois grupos relacionados ao sentido do fluxo de calor. Assim, existem equações para sentido do fluxo de calor ascendente

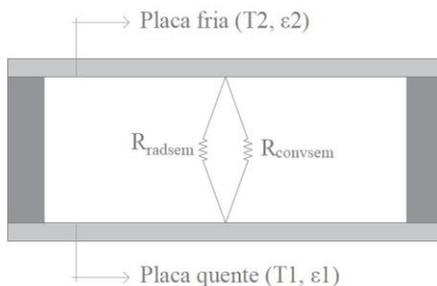
(relacionado ao inverno) e descendente (relacionado ao verão). Para ambos os grupos, desenvolveram-se equações com a presença de isolamento térmico reflexivo.

## 6.2.1 Sentido do fluxo de calor: ASCENDENTE

A Figura 131 e a Figura 132 mostram de forma esquemática a analogia feita através de resistências térmicas para fluxo de calor ascendente, sem e com a presença de isolamento térmico reflexivo, respectivamente.

### 6.2.1.1 Sem isolamento

Figura 131: Modelo por resistências térmicas para fluxo de calor ascendente e sem isolamento térmico



$$q_{conv_{sem}} = h_{conv_{sem}} (T1 - T2) \quad (19)$$

$$h_{conv_{sem}} = \frac{Nu_{sem} * k}{L} \quad (20)$$

$$R_{conv_{sem}} = \frac{T1 - T2}{q_{conv_{sem}}} \quad (21)$$

$$Ra_{sem} = \frac{g * beta * (T1 - T2) * (L^3)}{(difusiv * viscos)} \quad (22)$$

$$Nu_{sem} = 0,069 * Ra_{sem}^{1/3} * Pr^{0,074} \quad (23)$$

$$q_{rad_{sem}} = \frac{1}{\frac{1}{emis\_placa_1} + \frac{1}{emis\_placa_2} - 1} * sigma * (T1 + 273)^4 - (T2 + 273)^4 \quad (24)$$

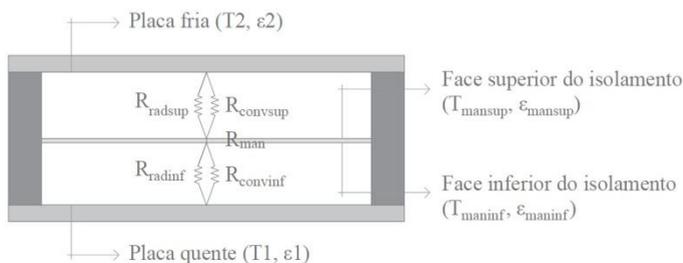
$$R_{rad_{sem}} = \frac{T1 - T2}{q_{rad_{sem}}} \quad (25)$$

$$q_{tot_{sem}} = q_{conv_{sem}} + q_{rad_{sem}} \quad (26)$$

$$R_{tot_{sem}} = \frac{T1 - T2}{q_{tot_{sem}}} \quad (27)$$

### 6.2.1.2 Com isolamento reflexivo

Figura 132: Modelo por resistências térmicas para fluxo de calor ascendente com isolamento térmico reflexivo



#### ✓ Camada de ar superior

$$q_{conv_{sup}} = h_{conv_{sup}} * (T_{man_{sup}} - T_2) \quad (28)$$

$$h_{conv_{sup}} = \frac{(Nu_{sup} * k)}{L_{sup}} \quad (29)$$

$$R_{conv_{sup}} = \frac{(T_{man_{sup}} - T_2)}{q_{conv_{sup}}} \quad (30)$$

$$Ra_{sup} = \frac{g * beta * (T_{man_{sup}} - T2) * (L_{sup}^3)}{(difusiv * viscos)} \quad (31)$$

$$Nu_{sup} = 0,069 * Ra_{sup}^{1/3} * Pr^{0,074} \quad (32)$$

$$hr_{sup} = \frac{1}{\frac{1}{emis\_placa1} + \frac{1}{emis\_placa2}^{-1}} * sigma * (T2 + 273)^2 + (T_{man_{sup}} + 273)^2 * (T2 + 273) + (T_{man_{sup}} + 273) \quad (33)$$

$$R_{rad_{sup}} = \frac{1}{hr_{sup}} \quad (34)$$

$$q_{rad_{sup}} = \frac{(T_{man_{sup}} - T2)}{R_{rad_{sup}}} \quad (35)$$

$$q_{esp_{sup}} = q_{rad_{sup}} + q_{conv_{sup}} \quad (36)$$

$$q_{man} = q_{esp_{sup}} \quad (37)$$

$$\frac{1}{R_{esp_{sup}}} = \frac{1}{R_{conv_{sup}}} + \frac{1}{R_{rad_{sup}}} \quad (38)$$

✓ **No isolamento**

$$q_{man} = \frac{(T_{man_{inf}} - T_{man_{sup}})}{R_{man}} \quad (39)$$

✓ **Na camada de ar inferior**

$$q_{conv_{inf}} = h_{conv_{inf}} * (T1 - T_{man_{inf}}) \quad (40)$$

$$R_{conv_{inf}} = \frac{(T1 - T_{man_{inf}})}{q_{conv_{inf}}} \quad (41)$$

$$h_{conv_{inf}} = \frac{(Nu_{inf} * k)}{L_{inf}} \quad (42)$$

$$Ra_{inf} = \frac{g * beta * (T1 - T_{man_{inf}}) * (L_{inf}^3)}{(difusiv * viscos)} \quad (43)$$

$$Nu_{inf} = 0,069 * Ra_{inf}^{1/3} * Pr^{0,074} \quad (44)$$

$$hr_{inf} = \frac{1}{(\frac{1}{emis.placa_1} + \frac{1}{emis.man_{inf}})^{-1}} * sigma * (T_{man_{inf}} + 273)^2 + (T1 + 273)^2 * (T_{man_{inf}} + 273) + (T1 + 273) \quad (45)$$

$$R_{rad_{inf}} = \frac{1}{hr_{inf}} \quad (46)$$

$$q_{rad_{inf}} = \frac{(T1 - T_{man_{inf}})}{R_{rad_{inf}}} \quad (47)$$

$$q_{esp_{inf}} = q_{rad_{inf}} + q_{conv_{inf}} \quad (48)$$

$$q_{man} = q_{esp_{inf}} \quad (49)$$

$$\frac{1}{R_{esp_{inf}}} = \frac{1}{R_{conv_{inf}}} + \frac{1}{R_{rad_{inf}}} \quad (50)$$

✓ **Resistência térmica total**

$$R_{tot_{com}} = R_{esp_{sup}} + R_{man} + R_{esp_{inf}} \quad (51)$$

✓ **Cálculo do  $R_{eq}$**

$$R_{eq} = R_{tot_{com}} - R_{tot_{sem}} \quad (52)$$

### 6.2.2 Sentido do fluxo de calor: DESCENDENTE

De acordo com INCROPERA; DEWITT (2008) e SABER (2014b) quando o sentido do fluxo de calor é descendente, a transferência de calor se dá por condução ( $Nu = 1$ ), independente do valor de Rayleigh. As equações são as mesmas citadas acima, considerando o número de Nusselt igual a 1.

A Figura 133 e a Figura 134 ilustram as analogias feitas baseadas em resistências térmicas para o cálculo da resistência térmica total da cavidade de ar, sem e com isolamento por reflexão.

Figura 133: Analogia por resistência térmica para fluxo de calor descendente sem isolamento térmico

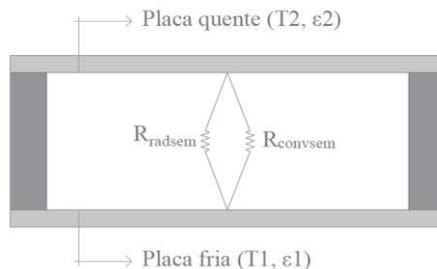
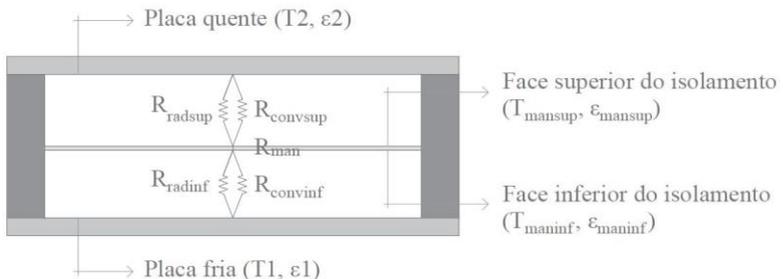


Figura 134: Analogia por resistência térmica para fluxo de calor descendente e com isolamento reflexivo



### 6.2.3 Caverna Inclinada

As equações para o cálculo da resistência térmica total que atravessa o sistema são basicamente as mesmas usadas para a caverna horizontal, o que difere é o cálculo do número de Nusselt, conforme é mostrado abaixo.

#### 6.2.3.1 Fluxo ascendente

O número de Nusselt para o fluxo de calor de baixo para cima para caverna inclinada depende do Nusselt para caverna horizontal (fluxo ascendente), do Nusselt para cavernas verticais, do ângulo crítico e do ângulo de inclinação em relação ao plano horizontal, conforme pode ser visto nas equações 53, 54 e 55.

$$Nu = 0,069 * Ra^{\frac{1}{3}} * Pr^{\frac{1}{4}} \quad (53)$$

$$Nu_{90} = 0,22 * \frac{Pr}{0,2 + Pr} * Ra^{0,28} * \left(\frac{H}{L}\right)^{-0,25} \quad (54)$$

$$Nu_{inclinado} = Nu * \left(\frac{Nu_{90}}{Nu}\right)^{\frac{\hat{a}ngulo\ real}{\hat{a}ngulo\ crítico}} * \text{sen}(\hat{a}ngulo\ crítico)^{\frac{\hat{a}ngulo\ real}{4 * \hat{a}ngulo\ crítico}} \quad (55)$$

#### 6.2.3.2 Fluxo descendente

Considerando o fluxo de calor descendente, as equações do número de Nusselt que deverão ser utilizadas são as equações 56 e 57.

$$Nu_{90} = 0,22 * \frac{Pr}{0,2 + Pr} * Ra^{0,28} * \left(\frac{H}{L}\right)^{-0,25} \quad (56)$$

$$Nu_{inclinado} = 1 + ((Nu_{90}) - 1) * \text{sen}(\hat{a}ngulo\ real) \quad (57)$$

## 6.2.4 Cavidades Trapezoidais

### 6.2.4.1 Fluxo Ascendente

As equações empregadas nesta pesquisa para o cálculo da resistência térmica de cavidades trapezoidais para o fluxo de calor de baixo para cima são as mesmas das empregadas até o momento, com exceção do cálculo do número de Nusselt. A equação utilizada foi a sugerida por LAM et al. (1989), conforme a Equação 58.

$$Nu = 0,168 \left[ Ra \frac{1 + \cos\theta}{2} \right]^{0,278} x \left[ \frac{1 - \cos\theta}{\cos\theta - \cos\theta_{max}} \right]^{-0,199} \quad (58)$$

## 6.3 COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS POR MEIO DAS MEDIÇÕES NO CONDUTIVÍMETRO E DO MODELO MATEMÁTICO

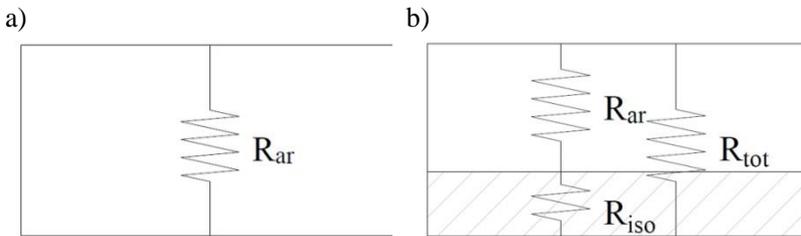
Os resultados mostrados neste item referem-se aos obtidos pelas medições no condutivímetro térmico, os quais foram comparados com os resultados obtidos pelo modelo matemático. Um dos motivos para a diferença verificada entre os resultados teóricos e os experimentais pode ser em função da posição do transdutor no condutivímetro térmico. SABER et al. (2012) realizaram estudos com condutivímetro térmico FOX-314, o mesmo utilizado nesta pesquisa, e verificaram que o fluxo de calor nas faces inferior e superior da cavidade do condutivímetro térmico não é uniforme, sendo que o maior fluxo é na parte central do equipamento, onde os sensores estão instalados, fato que pode explicar a diferença entre as resistências térmicas obtidas pelo equipamento e pelo modelo matemático.

Os estudos realizados referem-se: 1) ao efeito da espessura da camada de ar resistência térmica equivalente de cavidades de ar fechadas com fluxo de calor descendente; 2) a influência da temperatura média da resistência térmica de cavidades de ar fechadas para fluxo de calor descendente; 3) a influência da diferença de temperatura e do sentido do fluxo de calor na resistência térmica de cavidades de ar retangulares fechada na resistência térmica; e 4) a influência da incorporação de uma manta fina, com e sem baixa emissividade, na resistência térmica da cavidade de ar.

### 6.3.1 Efeito da variação da espessura da cavidade de ar na resistência térmica equivalente

Quando se insere um isolamento térmico em um sistema que anteriormente era formado por uma cavidade de ar (Figura 135a), a resistência térmica total do sistema será a soma das resistências térmicas do ar e do isolamento (Figura 135b), o isolamento tende a aumentar a resistência térmica total.

Figura 135: Esquema das resistências térmicas sem isolamento térmico (a) e com isolamento térmico (b)

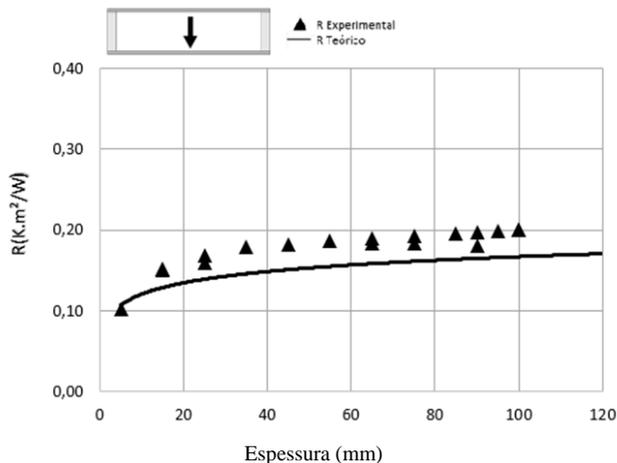


Esse “acrécimo” na resistência térmica proporcionada pelo isolamento será chamado de resistência térmica equivalente, conforme a Equação 52.

Assim, avaliou-se a influência do aumento da espessura da camada de ar na resistência térmica da cavidade. Resultados experimentais e do modelo matemático podem ser vistos na Figura 136.

Observou-se que a resistência térmica apresentou maior variação para as espessuras menores, de até 50 mm. Para espessuras maiores, a resistência térmica apresentou tendência a não variar muito, desta forma, escolheu-se a espessura de 50 mm para a realização dos próximos ensaios. Quando a comparação entre os resultados experimentais e teóricos, verificou-se pouca diferença entre os mesmos, além de ambos resultados apresentarem a mesma tendência.

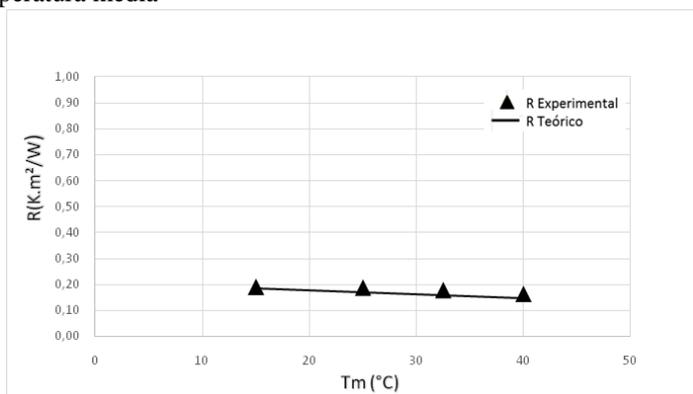
Figura 136: Influência da variação da espessura da cavidade de ar na resistência térmica



### 6.3.2 Influência da temperatura média na resistência térmica de cavidade retangular horizontal e fechada

Os resultados experimentais e teóricos apresentaram boa congruência dos resultados. Outro ensaio realizado foi verificar se a resistência térmica variava com o aumento da temperatura média. Verificou-se que conforme a temperatura aumenta, a resistência térmica tende a diminuir ligeiramente, conforme mostra a Figura 137.

Figura 137: Resistência térmica da cavidade de ar em função da temperatura média



### 6.3.3 Resistência térmica da cavidade de ar em função da diferença de temperatura e do sentido do fluxo de calor

No decorrer deste ensaio foi avaliada a resistência térmica em função da diferença de temperatura da cavidade e do sentido do fluxo de calor. Verificou-se que a diferença de temperatura exerceu pouca influência na resistência térmica, conforme pode ser visto na Figura 138 e na Figura 139. Conforme se aumentou a diferença de temperatura, para qualquer sentido de fluxo de calor, a resistência térmica pouco variou. Novamente verificou-se boa concordância entre os resultados teóricos e experimentais.

Figura 138: Resistência térmica em função da diferença de temperatura – fluxo descendente

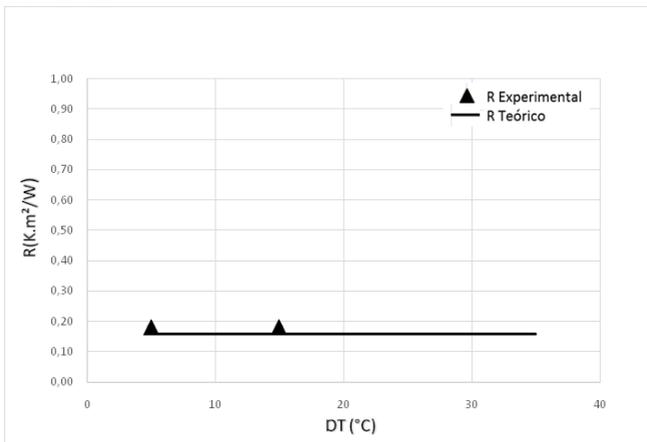
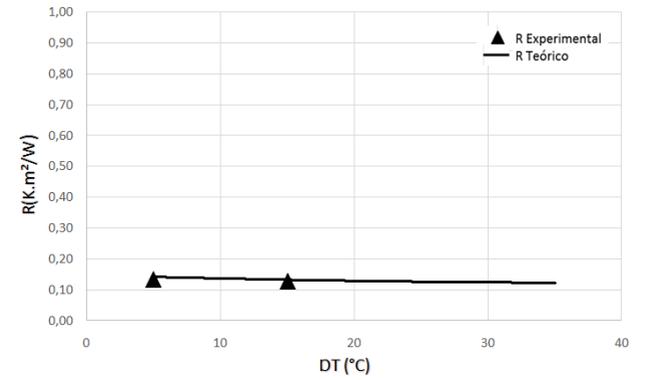


Figura 139: Resistência térmica em função da diferença de temperatura – fluxo ascendente



O sentido do fluxo de calor apresentou maior influência na resistência térmica. Para fluxo de calor descendente a resistência encontrada foi de aproximadamente 0,18 m²K/W, enquanto que para o sentido ascendente o valor encontrado foi de aproximadamente 0,12 m²K/W.

Quando o fluxo de calor é descendente, o ar tende permanecer parado na cavidade e a velocidade do ar tende também a ser muito baixa. Com o sentido ascendente, o ar menos denso se move para a camada superior da cavidade, criando um movimento de ar. Esse movimento do ar tende a aumentar com o aumento da diferença de temperatura, e cria correntes de convecção com a velocidade do ar maior quando comparada com o fluxo descendente, e esse fato reduz a resistência térmica da cavidade de ar para fluxo ascendente.

### 6.3.4 Ensaio com barreira radiante

Este ensaio mostrou que a simples inserção de uma manta, a qual divide a espessura da cavidade de ar em duas cavidades, foi capaz de aumentar a resistência térmica para ambos os sentidos de fluxo de calor, conforme mostram a Figura 140, a Figura 141, a Figura 142 e a Figura 143. A resistência térmica da cavidade de ar para fluxo descendente sem a presença de uma manta foi de 0,18 m²K/W. Quando foi inserido uma manta com emissividade de 0,90 nas duas faces, a resistência térmica foi de aproximadamente 0,35 m²K/W e com a aplicação de um material de

baixa emissividade a resistência térmica aumentou para aproximadamente  $1,60 \text{ m}^2\text{K/W}$ .

Para os resultados sem o uso da barreira radiante, para ambos os sentidos de fluxo de calor os resultados experimentais e teóricos foram semelhantes, já com o uso da barreira radiante, houveram diferenças nos valores de resistência térmica para ambos os sentidos de fluxo de calor.

Figura 140: Manta com emissividade de 0,9 nas duas faces – fluxo descendente

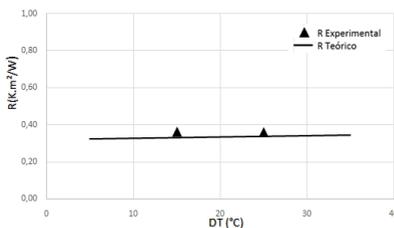


Figura 141: Manta com emissividade de 0,05 nas duas faces - fluxo descendente

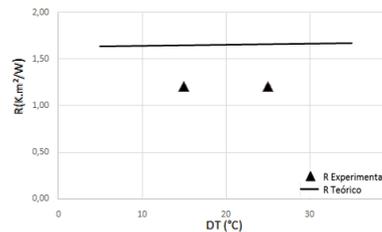


Figura 142: Manta com emissividade de 0,9 nas duas faces – fluxo ascendente

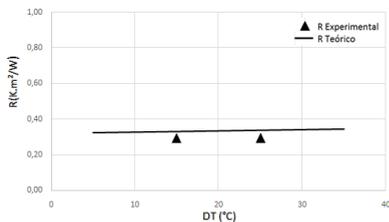
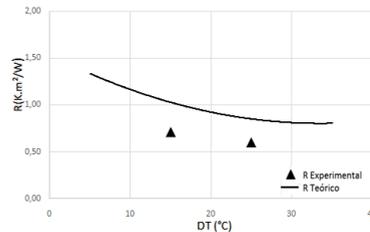


Figura 143: Manta com emissividade 0,05 nas duas faces – fluxo ascendente



Quando se utiliza um isolamento reflexivo, a superfície de baixa emissividade pode ser utilizada com a face aluminizada voltada para cima ou para baixo. Desta forma, foi analisado se o lado para o qual a face aluminizada está voltada influencia na resistência térmica total da cavidade. O resultado está mostrado nas Figuras 143, 144, 145 e 146. .

Percebeu-se que o lado para o qual a face aluminizada está voltada pouco interfere na resistência térmica total. Isso corrobora a indicação de instalar barreiras radiantes com a face brilhante voltada para

baixo, reduzindo o problema de envelhecimento devido a deposição de poeiras.

Figura 144: Baixa emissividade da face inferior da manta – fluxo descendente

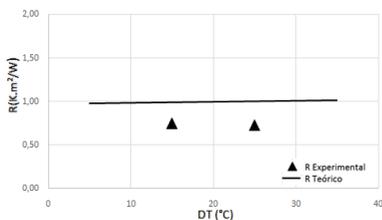


Figura 145: Baixa emissividade da face superior da manta – fluxo descendente

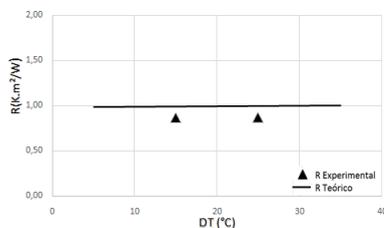


Figura 146: Baixa emissividade da face inferior da manta – fluxo ascendente

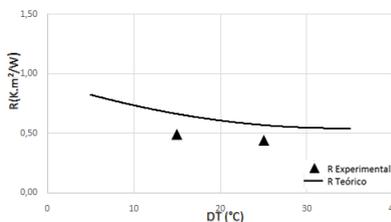
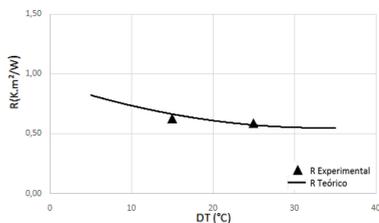


Figura 147: Baixa emissividade da face superior da manta – fluxo ascendente



## 6.4 COMPARAÇÕES ENTRE MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS NA BANCADA EXPERIMENTAL, NO TELHADO DE DIMENSÕES REAIS, NA SIMULAÇÃO, NO CONDUTIVÍMETRO TÉRMICO E O MODELO MATEMÁTICO

A Tabela 19 mostra os valores de resistência térmica para bancada experimental, para o telhado de dimensões reais, para a simulação computacional, para o condutivímetro térmico e o modelo matemático, com e sem o uso de barreira radiante. A resistência térmica apresentada foi calculada para o caso de uma cobertura com telhas de fibrocimento, espaço do ático e forro de PVC e todos os resultados foram comparados com a cobertura de referência da bancada experimental.

Tabela 19: Comparação entre as resistências térmicas (bancada experimental, telhado de dimensões reais, simulação computacional e condutivímetro térmico e modelo matemático)

	<b>Resistência térmica (<math>m^2K/W</math>)</b>	
	<b>Sentido de fluxo ascendente</b>	<b>Sentido de fluxo descendente</b>
Bancada experimental	0,19	0,26
Telhado de dimensões reais	0,17	0,31
Simulação computacional	0,15	0,17
Condutivímetro térmico	0,11	0,18
Modelo matemático	0,12	0,18

Os resultados obtidos através de medições experimentais em campo (na bancada experimental e no telhado de dimensões reais) apresentaram boa congruência entre si, com uma diferença de 11% em relação ao sentido de fluxo de calor ascendente e de 19% em relação ao sentido de fluxo de calor descendente. Este resultado foi o que mais de aproximou da bancada experimental.

A resistência térmica referente a simulação computacional diferiu em 21% (sentido de fluxo ascendente) e em 35% (sentido de fluxo descendente) em relação a bancada experimental. Neste caso, a diferença é associada a área de medição do fluxo de calor e em relação às superfícies laterais adiabáticas do modelo simulado.

Os resultados obtidos através do condutivímetro térmico apresentaram uma diferença de 42% e 31% para os sentidos de fluxo ascendente e descendente, respectivamente. Comparando-se os resultados obtidos por meio da bancada experimental e do modelo matemático, a diferença foi de 37% para o sentido de fluxo ascendente e de 31% para o sentido de fluxo descendente. As razões para isso podem estar associadas a alguns fatores, tais como fugas laterais pelo condutivímetro, geometria da cavidade, trapezoidal na bancada de testes e retangular no condutivímetro térmico e no modelo matemático, exposição a fatores climáticos, como trocas de calor por convecção e presença de umidade (chuvas e condensação do ar.).

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O desenvolvimento deste estudo teve como finalidade verificar o emprego de uma bancada experimental em escala reduzida para determinar a transferência de calor em áticos. Para atingir esse objetivo, além da construção da bancada experimental, foram desenvolvidas medições em telhado de dimensões reais, simulações computacionais, medições no equipamento FOX 314 (condutivímetro térmico) e o desenvolvimento de um modelo matemático para cavidades retangulares e fechadas.

Para calcular a resistência térmica é necessário separar os dados relativos a fluxo de calor descendente e ascendente, uma vez que o sentido do fluxo de calor interfere na resistência. Quando o fluxo de calor é descendente, o ar no ático apresenta baixa velocidade e possui a tendência de ficar estagnado, o que acarretou em aumento na resistência térmica. E quando o fluxo é ascendente, a velocidade do ar é maior, se formam correntes de convecção e a resistência térmica diminuiu.

A melhor forma de calcular a resistência térmica é através método sugerido pela ISO 9869, que é a razão do somatório de todos os valores de diferença de temperatura pelo somatório de todos os fluxos de calor.

Em relação a repetibilidade das resistências térmicas, encontrou-se um coeficiente de variação de 6,08% e desvio padrão de 0,02 para um período de 15 dias de medição. Além disso, verificou-se que a partir de dez dias de medição o erro se torna inferior a 1%.

Em relação ao Estudo 1 (todas coberturas com laje de concreto) e telhas de fibrocimento, verificou-se:

a) A calibração das coberturas para o Estudo 1 mostrou que as resistências térmicas das coberturas apresentaram valores que variaram de 0,17 m<sup>2</sup>K/W a 0,20 m<sup>2</sup>K/W, com o desvio padrão de 0,013. Em relação a cobertura 1 (de referência), a cobertura que mais apresentou diferença foi a cobertura 8, como uma diferença de 15% e as outras apresentaram uma diferença máxima de 5%.

b) A influência exercida pelo sentido do fluxo de calor na resistência térmica, cujos valores foram R=0,43 m<sup>2</sup>K/W e R=0,20 m<sup>2</sup>K/W para o período de temperaturas altas e o período de temperaturas amenas, respectivamente.

c) A rápida oxidação da superfície do isolamento reflexivo utilizado com a face aluminizada para cima. A emissividade do material passou de 0,06 (material novo) para 0,70 em seis meses de uso.

d) O isolamento reflexivo aumentou a resistência térmica do ático. A cobertura com alumínio voltado para baixo obteve resistência de  $2,14 \text{ m}^2\text{K/W}$  durante o verão e  $0,67 \text{ m}^2\text{K/W}$  para o período do inverno. Sem isolamento esses valores foram  $0,43 \text{ m}^2\text{K/W}$  e de  $0,20 \text{ m}^2\text{K/W}$ , para período do verão e do inverno, respectivamente.

Durante o desenvolvimento da pesquisa, a laje de concreto foi substituída por forro de PVC em seis coberturas e as outras duas permaneceram com laje de concreto, cujo estudo foi chamado de Estudo 2. Assim, realizou-se uma nova aferição para as coberturas com forro de PVC e outra para as coberturas com laje de concreto. A cobertura 1 (cobertura de referência) apresentou a resistência térmica igual a da cobertura 2, sendo de  $0,23 \text{ m}^2\text{K/W}$ . A menor diferença entre os valores de resistência térmica foi de 4,5% comparando-se a cobertura 1 com as coberturas 4 e 6 (ambas com  $R=0,22 \text{ m}^2\text{K/W}$ ) e a maior diferença, de 8,7%, ocorreu ao comparar a cobertura 1 com as coberturas 3 ( $R=0,25 \text{ m}^2\text{K/W}$ ) e 7 ( $R=0,21 \text{ m}^2\text{K/W}$ ). As coberturas com laje de concreto, a cobertura 5 e a cobertura 8, apresentaram diferença entre si de 3%.

O Estudo 2 foi desenvolvido de julho a dezembro de 2017, totalizando seis meses de medições, e verificou-se:

a) A cobertura com telhas de fibrocimento brancas contribuíram para evitar o ganho térmico médio em 59,6%, e contribuiu para aumentar as perdas térmicas em 4,3%.

b) As coberturas com isolamento térmico reflexivo e com isolamento resistivo (EPS) diminuíram tanto os ganhos quanto as perdas térmicas. Em relação aos ganhos térmicos, reduziram a transferência de calor em 66,2% e em 68,9%, respectivamente. Em relação as perdas térmicas, a cobertura com barreira radiante reduziu em 51% e a cobertura com EPS reduziu em 57,8%.

c) O desempenho térmico das telhas cerâmicas para o sentido de fluxo descendente foi melhor do que para a cobertura de referência em 24,7% para a cobertura com telha cerâmica impermeável, e em 34,6% para a telha porosa. Em relação ao efeito da adsorção ao vapor da água, a absorção da água proveniente da condensação noturna e em relação a absorção da água da chuva pelas telhas cerâmicas porosas, observou-se a influência da absorção da água da chuva em maior proporção, chegando a uma diferença de 18,8% no mês de dezembro em relação a cobertura com telhas cerâmicas impermeáveis. No mês de julho houve condensação noturna e pouca precipitação, e a diferença entre as coberturas de telhas porosas e impermeáveis foi de 5,5%, enquanto em setembro, mês que não houve precipitação e nem condensação noturna, ambas as coberturas de

telhas cerâmicas apresentaram o desempenho térmico similar, com diferença de 0,5%.

d) A cobertura verde reduziu os ganhos térmicos em 80,5% e diminuiu as perdas térmicas em 53% em comparação com a cobertura com telhas de fibrocimento e laje de concreto. Para o sentido de fluxo de calor descendente essa cobertura foi a que mais contribuiu para a redução na transferência de calor para o interior da bancada experimental em função da massa térmica proporcionada pelas camadas de drenagem e do solo, além do sombreamento e do resfriamento evaporativo proporcionado pela camada vegetal.

Para investigar a questão da escala, realizou-se um processo de simulação computacional de duas coberturas, uma com as mesmas dimensões da bancada experimental (base do trapézio igual a 0,70 m) e a outra com a dimensão que poderia ser aplicada a uma situação real (5,0 m). Com base nos resultados da simulação verificou-se que a escala exerceu pouca influência na resistência térmica da cavidade, uma vez que para o sentido de fluxo de calor ascendente a diferença entre as duas escalas foi de 3,6%, e para o sentido de fluxo de calor descendente a diferença foi de 6,3%.

Comparando-se os resultados obtidos entre as medições na bancada experimental e a simulação, obteve-se uma diferença de 21% para o sentido de fluxo de calor ascendente e uma diferença de 35% para o sentido de fluxo descendente. Essa última diferença pode estar associada às perdas térmicas que ocorrem pelas laterais da bancada, o que diminui o fluxo de calor e aumenta a resistência térmica e também pode estar associada a posição do transdutor de fluxo de calor, localizado em uma pequena área da região central do forro, enquanto que na simulação é considerado o fluxo de calor médio em toda a superfície.

Em relação à comparação dos resultados obtidos entre a bancada experimental e as medições no telhado de dimensões reais, encontrou-se uma diferença de 11% para o sentido de fluxo ascendente e de 19% para o sentido de fluxo descendente. Essa diferença pode estar relacionada a infiltração de ar no ático, devido as frestas existentes no telhado de dimensões reais, ao formato triangular do telhado de dimensões reais, que altera troca de calor por convecção quando comparado com a geometria trapezoidal da bancada de testes e também em função de que o ambiente interno da edificação de telhado de dimensões reais não apresentou a temperatura controlada.

Os resultados obtidos através dos ensaios realizados no condutímetro térmico FOX-314 foram comparados com os resultados obtidos pelo modelo matemático para cavidades retangulares. Nestes

ensaios verificou-se se a resistência térmica é dependente da espessura da cavidade de ar, da temperatura média, da diferença de temperatura, do sentido do fluxo de calor e avaliou-se também o impacto da inserção de um material de baixa emitância térmica no meio da cavidade de ar.

Comparando-se os resultados destes ensaios, a resistência térmica mostrou ser menos sensível com o aumento da diferença de temperatura. Conforme a diferença de temperatura aumentou, a resistência térmica tendeu a permanecer constante. Em relação à espessura da cavidade de ar, a resistência tendeu a ser dependente desta variável até certo valor e depois permaneceu praticamente constante. No que se refere à temperatura média, verificou-se que a resistência térmica apresentou leve redução com o aumento da temperatura.

Também foi analisado o impacto do sentido do fluxo de calor na resistência térmica, e constatou-se a mesma tendência dos resultados obtidos através da bancada experimental. A resistência térmica é maior para fluxo de calor descendente (aproximadamente  $0,18 \text{ m}^2\text{K/W}$ ) do que para sentido ascendente (aproximadamente  $0,13 \text{ m}^2\text{K/W}$ ). Com a presença do isolamento reflexivo a resistência aumentou para aproximadamente  $1,60 \text{ m}^2\text{K/W}$  e  $0,70 \text{ m}^2\text{K/W}$ , respectivamente.

## 7.1 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- ✓ Analisar a influência de variáveis ambientais, tais como radiação solar e velocidade dos ventos na resistência térmica das coberturas;
- ✓ Avaliar o desempenho térmico dos mais variados tipos de telhas;
- ✓ Continuar os esforços para avaliar o desempenho térmico de coberturas com telhas cerâmicas, realizar um número maior de coleta de dados em relação a massa da telha e aos sensores de condensação, e também, realizar simulações computacionais em programas que considerem a migração de umidade, como por exemplo o WUFI.

## 8. REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-3: Desempenho térmico de edificações Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.** p. 30, 2005.
- AL-HOMOUD, M. S. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. **Building and Environment**, v. 40, n. 3, p. 353–366, 2005.
- AL-SALLAL, K. A. Comparison between polystyrene and fiberglass roof insulation in warm and cold climates. **Renewable Energy**, v. 28, n. 4, p. 603–611, 2003.
- AL-SANEA, S. A. Thermal performance of building roof elements. **Building and Environment**, v. 37, n. 7, p. 665–675, 2002.
- ALGARNI, S.; NUTTER, D. Influence of dust accumulation on building roof thermal performance and radiant heat gain in hot-dry climates. **Energy and Buildings**, v. 104, p. 181–190, 2015.
- ALVARADO, J. L.; MARTÍNEZ, E. Passive cooling of cement-based roofs in tropical climates. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 3, p. 358–364, 2008.
- ALVARADO, J. L.; TERRELL, W.; JOHNSON, M. D. Passive cooling systems for cement-based roofs. **Building and Environment**, v. 44, n. 9, p. 1869–1875, 2009.
- ASADI, S.; HASSAN, M.; BEHESHTI, A. Development and validation of a simple estimating tool to predict heating and cooling energy demand for attics of residential buildings. **Energy and Buildings**, v. 54, p. 12–21, 2012.
- ASADI, S.; HASSAN, M. M. Evaluation of the thermal performance of a roof-mounted radiant barrier in residential buildings: Experimental study. **Journal of Building Physics**, v. 38, n. 1, p. 66–80, 2014.
- ASHRAE, **ASHRAE Handbook - Fundamentals**, American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers, Atlanta, 2009.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - ASTM. Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus, **ASTM C-518**, West Conshohocken, USA, 2015.
- Balçoço Energético Nacional (BEN). **Empresa de Pesquisa Energética**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\_Final\_BEN\_2015.pdf>.

BAO, H. et al. Double-layer nanoparticle-based coatings for efficient terrestrial radiative cooling. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 168, n. February, p. 78–84, 2017.

BARRIO, E. P. DEL. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. **Energy and Buildings**, v. 27, n. 2, p. 179–193, 1998.

BEJAN, A. **Convection Heat Transfer**. 3<sup>o</sup> ed. Wiley, 2004. 694 p.

BELUSKO, M.; BRUNO, F.; SAMAN, W. Investigation of the thermal resistance of timber attic spaces with reflective foil and bulk insulation, heat flow up. **Applied Energy**, v. 88, n. 1, p. 127–137, 2011.

BEN CHEIKH, H.; BOUCHAIR, A. Passive cooling by evapo-reflective roof for hot dry climates. **Renewable Energy**, v. 29, n. 11, p. 1877–1886, 2004.

BERDAHL, P. et al. Weathering of roofing materials - An overview. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 4, p. 423–433, 2008.

BEVILACQUA, P. et al. Plant cover and floristic composition effect on thermal behaviour of extensive green roofs. **Building and Environment**, v. 92, p. 305–316, 2015.

BUENO, A. **Transferência de Calor e Umidade em Telhas: Simulação e Análise Experimental**. Dissertação (mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, UFSC. Florianópolis, 102p. 1994.

BUENO A. D, PHILIPPI P.C, LAMBERTS RO, D. C. N. J. A. **Determinação de propriedades físicas das telhas cerâmicas relacionadas a transferência de calor e umidade**. 6<sup>o</sup> ENCIT, Florianópolis, Brasil, 1996.

Casa eficiente: Bioclimatologia e desempenho térmico/editores: Roberto Lamberts Enedir Ghisi Cláudia Donald Pereira Juliana Oliveira Batista. Florianópolis: UFSC/LabEEE; 2010.

ÇENGEL, Y. A. **Transferência de calor e massa: Uma abordagem prática**. Terceira ed. São Paulo: McGraw-Hill Interamericana do Brasil Ltda, 2009.

CHANG, P. C.; CHIANG, C. M.; LAI, C. M. Development and preliminary evaluation of double roof prototypes incorporating RBS (radiant barrier system). **Energy and Buildings**, v. 40, n. 2, p. 140–147, 2008.

COMA, J. et al. Thermal assessment of extensive green roofs as passive tool for energy savings in buildings. **Renewable Energy**, v. 85, p. 1106–1115, 2016.

CORCIONE, M. Effects of the thermal boundary conditions at the sidewalls upon natural convection in rectangular enclosures heated from below and

cooled from above. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 42, n. 2, p. 199–208, 2003.

CRAVEN, C.; GARBER-SLAGHT, R. **Reflective Insulation in Cold Climates** Fairbanks, Alaska, USA, 2011.

Department of Energy (DOE), Assistant Secretary, Energy Efficiency and Renewable Energy. Sheet Fact Insulation, 2002. OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY Oak Ridge, Tennessee 37831-6285.

D’ORAZIO, M. et al. Effects of roof tile permeability on the thermal performance of ventilated roofs: Analysis of annual performance. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 5, p. 911–916, 2008.

D’ORAZIO, M. et al. Thermal performance of an insulated roof with reflective insulation: Field tests under hot climatic conditions. **Journal of Building Physics**, v. 36, n. 3, p. 229–246, 2013.

D’ORAZIO, M.; DI PERNA, C.; DI GIUSEPPE, E. The effects of roof covering on the thermal performance of highly insulated roofs in Mediterranean climates. **Energy and Buildings**, v. 42, n. 10, p. 1619–1627, 2010.

DESJARLAIS, A. O. Radiant Barrier Fact Sheet. 2010.

DIMOUDI, A.; ANDROUTSOPOULOS, A.; LYKLOUDIS, S. Summer performance of a ventilated roof component. **Energy and Buildings**, v. 38, n. 6, p. 610–617, 2006.

DIMOUDI, A.; LYKLOUDIS, S.; ANDROUTSOPOULOS, A. Thermal performance of an innovative roof component. **Renewable Energy**, v. 31, n. 14, p. 2257–2271, 2006.

SANTOS, G. H. dos; MENDES, N. Numerical analysis of hygrothermal performance of reflective insulated roof coatings. **Applied Thermal Engineering**, v. 81, p. 66–73, 2015.

ESCUDERO, C. et al. Experimental thermal characterization of radiant barriers for building insulation. **Energy and Buildings**, v. 59, p. 62–72, 2013.

FAIREY, P. **Radiant Energy Transfer and Radiant Barrier Systems in Buildings 1** Florida Solar Energy Center Florida, 1994a. Disponível em: <www.fsec.ucf.edu>

FAIREY, P. Radiant Energy Transfer and Radiant Barrier Systems in Buildings 1. **Florida Solar Energy Center**, n. May, p. 1–5, 1994b.

GAGLIANO, A. et al. Thermal performance of ventilated roofs during summer period. **Energy and Buildings**, v. 49, p. 611–618, 2012.

GANGULY, A.; CHOWDHURY, D.; NEOGI, S. Performance of Building

Roofs on Energy Efficiency - A Review. v. 90, n. December 2015, p. 200–208, 2016.

GARG, V. et al. Development for cool roof calculator for India. **Energy and Buildings**, v. 114, p. 136–142, 2016.

GLOBE, S.; DROPKIN, D. Natural convection Heat Transfer in Liquids Confined Between Two Horizontal Plates. **Journal of Heat Transfer**, v. 81C, n. 24, 1959.

GUO, W. et al. Study on energy saving effect of heat-reflective insulation coating on envelopes in the hot summer and cold winter zone. **Energy and Buildings**, v. 50, p. 196–203, 2012.

GÜTHS, S. et al. **Um transdutor de fluxo de calor a gradiente tangencial**. XI Congresso Brasileiro em Engenharia Mecânica. Belo Horizonte, Minas Gerais: Anais do XI COBEM, 1995

HAMMAMI, M.; MSEDDE, M.; BACCAR, M. Numerical Study of Coupled Heat and Mass Transfer in a Trapezoidal Cavity. **Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics**, v. 1, n. 3, p. 216–226, 2007.

HAUSER, G. et al. Experimental and numerical investigations for comparing the thermal performance of infrared reflecting insulation and of mineral wool. **Energy and Buildings**, v. 58, p. 131–140, 2013.

HOLLANDS, K. G. T.; RAITHBY, G. D.; KONICEK, L. Correlation equations for free convection heat transfer in horizontal layers of air and water. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 18, n. 7–8, p. 879–884, 1975.

INABA, H. Experimental Study of Natural Convection Inclined. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 27, n. 8, p. 1127–1139, 1984.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P. **Fundamentos De Transferencia De Calor E De Massa**. 5° ed. Rio de Janeiro: 494p. 1998.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION - ISO. Thermal insulation — Building elements — In-situ measurement of thermal resistance and thermal transmittance — Part 1: Heat flow meter method, **ISO 9869**, 2014.

JAFFAL, I.; OULDBOUKHITINE, S.-E.; BELARBI, R. A comprehensive study of the impact of green roofs on building energy performance. **Renewable Energy**, v. 43, p. 157–164, jul. 2012.

JIM, C. Y. Building thermal-insulation effect on ambient and indoor thermal performance of green roofs. **Ecological Engineering**, v. 69, p. 265–275,

2014.

LAM, S. W.; GANI, R.; SYMONS, J. G. Experimental and Numerical Studies of Natural Convection in Trapezoidal Cavities. **Journal of Heat Transfer**, v. 111, n. 2, p. 372, 1989.

LAMBERTS, R. **Desempenho térmico de coberturas leves com ático: bancada de testes e modelo matemático**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 108p, 1983.

LAMBERTS, R. **Heat transfer through roofs of low cost brazilian houses**. Tese de doutorado, Department of Civil Engineering, University of Leeds, 145p. 1988.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. 3<sup>o</sup> edição, Rio de Janeiro, 2014. 382p.

LAZZARIN, R. M.; CASTELLOTTI, F.; BUSATO, F. Experimental measurements and numerical modelling of a green roof. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 12, p. 1260–1267, 2005.

LEONG, W. H.; HOLLANDS, K. G. T.; BRUNGER, A. P. On a physically-realizable benchmark problem in internal natural convection. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 41, n. 23, p. 3817–3828, 1998.

LI, D. et al. Numerical analysis on thermal performance of naturally ventilated roofs with different influencing parameters. **Sustainable Cities and Society**, v. 22, p. 86–93, 2016.

LIN, Y. J.; LIN, H. T. Thermal performance of different planting substrates and irrigation frequencies in extensive tropical rooftop greeneries. **Building and Environment**, v. 46, n. 2, p. 345–355, 2011.

LIZ, D. G. S. DE. **Análise experimental do comportamento térmico do telhado verde extensivo para Florianópolis**. Dissertação de mestrado, Programa de pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016. 113p.

LOUREIRO, K. C. G. Análise de desempenho térmico e consumo de energia de residências na cidade de Manaus. Dissertação de mestrado, Programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 2003. 139p.

MATHEWS, E. ; KLEINGELD, M.; TAYLOR, P. . Estimating the electricity savings effect of ceiling insulation. **Building and Environment**, v. 34, n. 4, p. 505–514, 1999.

MEDINA, M. **A comprehensive review of radiant barrier research**

**including laboratory and field experiments.** ASHRAE Transactions, 2012.

MEDINA, M. A. On the performance of radiant barriers in combination with different attic insulation levels. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 1, p. 31–40, 2000a.

MEDINA, M. A. Effects of shingle absorptivity, radiant barrier emissivity, attic ventilation flowrate, and roof slope on the performance of radiant barriers. **International Journal of Energy Research**, v. 24, n. 8, p. 665–678, 2000b.

MEDINA, M. A.; YOUNG, C. B. Evaluating the Sensitivity of Attic Radiant Barrier Performance to Climate Parameters. **Journal of Energy Engineering**, v. 134, n. 1, p. 2–5, 2008.

MICHELS, C.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. Evaluation of heat flux reduction provided by the use of radiant barriers in clay tile roofs. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 4, p. 445–451, 2008a.

MICHELS, C.; LAMBERTS, R.; GÜTHS, S. Theoretical/experimental comparison of heat flux reduction in roofs achieved through the use of reflective thermal insulators. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 4, p. 438–444, 2008b.

MIRANVILLE, F. et al. On the thermal behaviour of roof-mounted radiant barriers under tropical and humid climatic conditions: Modelling and empirical validation. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 10, p. 997–1008, 2003.

MIRANVILLE, F. et al. A combined approach for determining the thermal performance of radiant barriers under field conditions. **Solar Energy**, v. 82, n. 5, p. 399–410, 2008.

MIRANVILLE, F. et al. Evaluation of the thermal resistance of a roof-mounted multi-reflective radiant barrier for tropical and humid conditions: Experimental study from field measurements. **Energy and Buildings**, v. 48, p. 79–90, 2012.

NICOLETTE, V. F.; YANG, K. T.; LLOYD, J. R. Transient cooling by natural convection in a two-dimensional square enclosure. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 28, n. 9, p. 1721–1732, 1985.

O'TOOLE, J.; SILVERSTON, P. Correlations of convective heat transfer in confined horizontal layers. **Chemical engineering progress symposium**, v. 57, p. 81–86, 1961.

OBERKAMPF, W. L.; TRUCANO, T. G. Verification and validation in computational fluid dynamics. **Progress in Aerospace Sciences**, v. 38 p. 209–272, 2002.

OSTRACH, S. Natural convection in enclosures. **Advances in Heat Transfer**, 1972.

ÖZİŞİK, M NECATI. **Heat transfer: A basic approach**. 1° edição. McGraw-Hill: Estados Unidos, 780 p. 1985.

OZOE, H.; SAYAMA, H.; CHURCHILL, S. W. Natural convection in an inclined rectangular channel at various aspect ratios and angles-experimental measurements. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 18, n. 12, p. 1425–1431, 1975.

PARIZOTTO, S.; LAMBERTS, R. Investigation of green roof thermal performance in temperate climate: A case study of an experimental building in Florianópolis city, Southern Brazil. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 7, p. 1712–1722, 2011.

PARKER, D. S.; BARKASZI JR, S. F. Roof solar reflectance and cooling energy use: field research results from Florida. **Energy and Buildings**, v. 25, n. 2, p. 105–115, 1997.

PARKER, D. S.; SONNE, J. K.; SHERWIN, J. R. Comparative Evaluation of the Impact of Roofing Systems on Residential Cooling Energy Demand in Florida Research Description. **Solar Energy**, p. 219–234, 1998.

PASSOS, B. A. **Impacto do uso de isolante térmico em habitações de interesse social nas diferentes condições climáticas brasileiras**. Dissertação de mestrado, programa de pós-graduação em arquitetura e urbanismo, Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

PISELLO, A. L.; ROSSI, F.; COTANA, F. Summer and winter effect of innovative cool roof tiles on the dynamic thermal behavior of buildings. **Energies**, v. 7, n. 4, p. 2343–2361, 2014.

PRADO, R. T. A.; FERREIRA, F. L. Measurement of albedo and analysis of its influence the surface temperature of building roof materials. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 4, p. 295–300, 2005.

REFLECTIVE INSULATION MANUFACTURERS ASSOCIATION INTERNATIONAL (RIMA-I). **Understanding and Using Reflective Insulation, Radiant Barriers and Radiation Control Coatings** Lenexa, Kansas, USA Reflective Insulation Manufacturers Association International (RIMA-I), , 2014.

ROGER A HINRICHES; MERLIN KLEINBACH; LINEU BELICO DOS REIS. **Energia e Meio Ambiente**. 4° ed. São Paulo: Cengage Learning, 2010.

SABER, H. H. Investigation of thermal performance of reflective insulations for different applications. **Building and Environment**, v. 52, p. 32–44, 2012.

SABER, H. H. et al. Numerical modeling and experimental investigations of thermal performance of reflective insulations. **Journal of Building Physics**, v. 36, n. 2, p. 163–177, 2012.

SABER, H. H. Practical correlations for the thermal resistance of vertical enclosed airspaces for building applications. **Building and Environment**, v. 59, p. 379–396, 2013a.

SABER, H. H. Practical correlation for thermal resistance of 45° sloped enclosed airspaces with downward heat flow for building applications. **Building and Environment**, v. 65, p. 154–169, 2013b.

SABER, H. H. Practical correlations for thermal resistance of horizontal enclosed airspaces with upward heat flow for building applications. **Building and Environment**, v. 61, p. 169–187, 2013c.

SABER, H. H. Practical correlation for thermal resistance of horizontal enclosed airspaces with downward heat flow for building applications. **Journal of Building Physics**, v. 37 (4), p. 403–435, 2014a.

SABER, H. H. Practical correlation for thermal resistance of horizontal enclosed airspaces with downward heat flow for building applications. **Building and Environment**, v. 37 (4), p. 403–435, 2014b.

SAILOR, D. J. A green roof model for building energy simulation programs. v. 40, p. 1466–1478, 2008.

SANTAMOURIS, M. et al. Investigating and analysing the energy and environmental performance of an experimental green roof system installed in a nursery school building in Athens, Greece. **Energy**, v. 32, n. 9, p. 1781–1788, 2007.

SHARIAH, A. et al. Effects of absorptance of external surfaces on heating and cooling loads of residential buildings in Jordan. **Energy Conversion and Management**, v. 39, n. 3–4, p. 273–284, 1998.

SIMPSON, J. R.; MCPHERSON, E. G. The effects of roof albedo modification on cooling loads of scale model residences in Tucson, Arizona. **Energy and Buildings**, v. 25, n. 2, p. 127–137, 1997.

SLATER, J. W. **Tutorial on CFD Verification and Validation**. Disponível em: <<https://www.grc.nasa.gov/WWW/wind/valid/tutorial/tutorial.html>>. Acesso em: 22 maio. 2017.

SOUBDHAN, T.; FEUILLARD, T.; BADE, F. Experimental evaluation of insulation material in roofing system under tropical climate. **Solar Energy**, v. 79, n. 3, p. 311–320, 2005.

SUEHRCKE, H.; PETERSON, E. L.; SELBY, N. Effect of roof solar

reflectance on the building heat gain in a hot climate. **Energy and Buildings**, v. 40, n. 12, p. 2224–2235, 2008.

TANG, X.; QU, M. Phase change and thermal performance analysis for green roofs in cold climates. **Energy and Buildings**, v. 121, p. 165–175, 2016.

THEODOSIOU, T. G. Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 9, p. 909–917, 2003.

TIBERIO CARDOSO, G.; VECCHIA, F. Comparison of thermal performance between test cells with different coverage systems for experimental typical day of heat in Brazilian Southeastern. **Frontiers of Architectural Research**, v. 3, n. 3, p. 271–282, 2014.

TIWARI, G.; LAWRENCE, S. New heat and mass transfer relations for higher operating temperature ranges of distillation unit. v. Delhi, Índ, 1992.

TIWARI, G. N. et al. Simulation of convective mass transfer in a solar distillation process. **Energy Conversion and Management**, v. 38, n. 8, p. 761–770, 1997.

UNEP (United Nations Environment Programme). **STATE OF PLAY OF SUSTAINABLE BUILDING IN LATIN AMERICA, 2014**. -. Disponível em: <[http://staging.unep.org/sbci/pdfs/State of Play Sustainable Buildings LA2014 \\_ENG.pdf](http://staging.unep.org/sbci/pdfs/State%20of%20Play%20Sustainable%20Buildings%20LA2014_ENG.pdf)>.

VITTORINO, F.; SATO, N.; AKUTSU, M. Desempenho térmico de isolantes refletivos e barreiras radiantes aplicados em coberturas. **Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído e Encontro Latino Americano de Conforto no Ambiente Construído**, n. 1, p. 1277–1284, 2003.

WINIARSKI, D. W.; O'NEAL, D. L. A quasi-steady-state model of attic heat transfer with radiant barriers. **Energy and Buildings**, v. 24, n. 3, p. 183–194, 1996.

YAGHOUBIAN, N.; SREBRIC, J. Influence of plant coverage on the total green roof energy balance and building energy consumption. **Energy and Buildings**, v. 103, p. 1–13, 2015.

ZHAI, Y. et al. Scalable-manufactured randomized glass-polymer hybrid metamaterial for daytime radiative cooling. **Science**, v. 355, n. 6329, p. 1062–1066, 2017.

ZHANG, Q. et al. The capacity of greening roof to reduce stormwater runoff and pollution. **Landscape and Urban Planning**, v. 144, p. 142–150, 2015.

ZINGRE, K. T. et al. Modeling of cool roof heat transfer in tropical climate.

**Renewable Energy**, v. 75, p. 210–223, 2015a.

ZINGRE, K. T. et al. Modelling of cool roof performance for double-skin roofs in tropical climate. **Energy**, v. 82, p. 813–826, 2015b.

ZINGRE, K. T.; WAN, M. P.; YANG, X. A new RTTV (roof thermal transfer value) calculation method for cool roofs. **Energy**, v. 81, p. 222–232, 2015.

## APÊNDICE 1

### CALIBRAÇÃO DOS TERMOPARES TIPO T

Antes de instalar os termopares em suas devidas posições, verificou-se se todos os 48 sensores deste tipo estavam medindo o mesmo valor e, conhecendo-se a temperatura do meio que os termopares estavam inseridos, foi necessário verificar se os mesmos mediram a temperatura do meio.

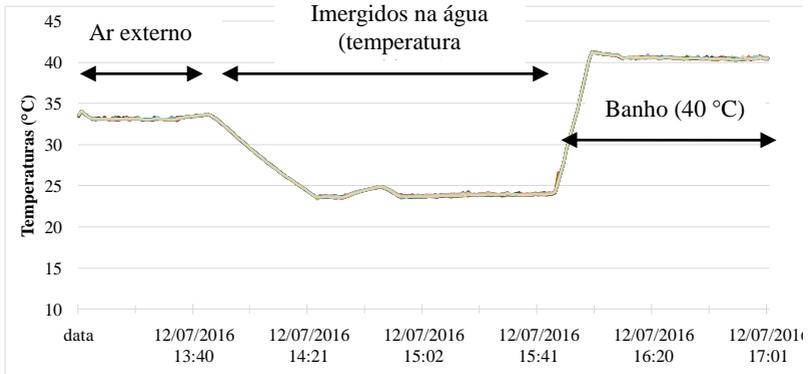
Utilizou-se o banho MQBMP-01 mostrado na Figura 148. As pontas dos termopares foram agrupadas e, em um primeiro momento, as mesmas foram deixadas em temperatura ambiente (sombreada), depois imergidas na água em temperatura ambiente e após controlou-se a temperatura da água em 40 °C.

No Figura 149: é possível acompanhar essas alterações em função da temperatura, quando deixadas expostas ao ambiente externo a temperatura foi em torno de 34 °C, imergidas na água em temperatura ambiente foi de 24 °C e com a temperatura controlada em 40°C, os sensores apresentaram essa mesma temperatura. O mais importante é observar que os termopares apresentaram temperatura similar com a de controle (40 °C). Verificado isso, os sensores de temperatura foram instalados nos pontos de medição da bancada experimental.

Figura 148: Banho MQBMP-01



Figura 149: : Temperaturas dos 48 termopares

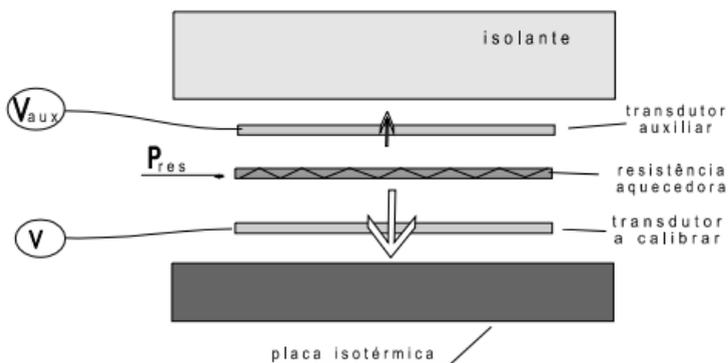


## APÊNDICE 2

### CALIBRAÇÃO DOS TRANSDUTORES DE FLUXO DE CALOR

Realizou-se a calibração de 18 transdutores de fluxo de calor, dez para a parte superior e oito para a parte inferior da laje/forro de PVC. Para tanto foi empregado o Método do transdutor auxiliar. O fluxo de calor perdido pelo isolante é medido por um transdutor previamente calibrado, sendo subtraído do valor dissipado pela resistência aquecedora. Este método considera que consiste no uso de uma resistência aquecedora colocada na superfície do transdutor que será calibrado (principal) e de um transdutor já calibrado (auxiliar) posicionado sobre esta resistência, todos com a mesma dimensão ( $0,01 \text{ m}^2$ ). A resistência aquecedora gera uma potência conhecida, dissipando calor entre os dois transdutores. Determina-se então a fuga de calor (energia que não está sendo absorvida pelo transdutor a ser calibrado) através do transdutor auxiliar, e considera-se que o restante da energia é transmitida através do transdutor principal. A Figura 150 mostra o sistema utilizado para a calibração dos fluxímetros. No contato entre a a o transdutor e a resistência aquecedora foi aplicado um gel (com pH neutro) para melhor a condutividade e aumentar a passagem o fluxo de calor na direção do transdutor principal.

Figura 150: Sistema de calibração do transdutor



#### Cálculo das constantes de calibração

Cada transdutor apresentou uma área de  $0,01 \text{ m}^2$  e a resistência térmica da resistência aquecedora foi de  $47,9 \text{ Ohms}$ . Com a potência ( $P$ )

de 12,11 W calculou-se a corrente elétrica (I) necessária, de acordo com a Equação (59).

$$P = R * I \quad (59)$$

Onde:

P = potência (W)

R = resistência elétrica (Ohm)

I = corrente elétrica (A)

A corrente elétrica encontrada é utilizada na resistência aquecedora que produz a potência desejada. Esta potência é então dissipada na forma de calor. Os transdutores produzem um sinal de resposta em mV proporcional ao fluxo de calor que esta sendo transmitido, sendo este sinal é registrado por um multímetro digital. Utilizando a Equação (60) é possível determinar as constantes para os demais transdutores:

$$c = \frac{q'' - c_{aux} * U_{aux}}{U} \quad (60)$$

Onde:

c = Constante de calibração do transdutor principal (W/mV);

q'' = Potência dissipada pela resistência aquecedora (W);

c<sub>aux</sub> = Constante de calibração do transdutor auxiliar (W/mV);

U<sub>aux</sub> = Sinal resposta da passagem de calor pelo transdutor auxiliar (mV);

U = Sinal resposta da passagem de calor pelo transdutor principal (mV).

As constantes de calibração para os dezoito fluxímetros utilizados na pesquisa estão apresentadas na Tabela 20.

Tabela 20: Constantes de calibração dos transdutores de fluxo de calor

HF	Area (m <sup>2</sup> )	R (ohm)	V Alim	Sinal Tr (MicroV)	Sinal aux.	c aux	Pot(W)	Pot Fugas (W)	Pot liq tr (W)	fugas %	fluxo liq(W/m2)	s (microV/W)	c (W/m2/microV)
1	0,01	47,9	12,11	1834	37	0,0953	3,06	0,04	3,026	1,2	303	606	0,16501
2	0,01	47,9	12,11	2033	131	0,0953	3,06	0,12	2,937	4,1	294	692	0,14446
3	0,01	47,9	12,11	2139	110	0,0953	3,06	0,10	2,957	3,4	296	723	0,13823
4	0,01	47,9	12,11	1902	56	0,0953	3,06	0,05	3,008	1,7	301	632	0,15816
5	0,01	47,9	12,11	3733	86	0,0953	3,06	0,08	2,980	2,7	298	1253	0,07982
6	0,01	47,9	12,11	2259	17	0,0953	3,06	0,02	3,045	0,5	305	742	0,13481
7	0,01	47,9	12,11	2368	62	0,0953	3,06	0,06	3,003	1,9	300	789	0,12680
8	0,01	47,9	12,11	2082	43	0,0953	3,06	0,04	3,021	1,3	302	689	0,14508
9	0,01	47,9	12,11	10551	15	0,0953	3,06	0,01	3,047	0,5	305	3462	0,02888
10	0,01	47,9	12,11	8134	16	0,0953	3,06	0,02	3,046	0,5	305	2670	0,03745
11	0,01	47,9	12,11	8480	54	0,0953	3,06	0,05	3,010	1,7	301	2817	0,03550
12	0,01	47,9	12,11	7539	64	0,0953	3,06	0,06	3,001	2,0	300	2512	0,03980
13	0,01	47,9	12,11	9253	95	0,0953	3,06	0,09	2,971	3,0	297	3114	0,03211
14	0,01	47,9	12,11	7911	58	0,0953	3,06	0,06	3,006	1,8	301	2631	0,03800
15	0,01	47,9	12,11	1798	195	0,0953	3,06	0,19	2,876	6,1	288	625	0,15994
16	0,01	47,9	12,11	2205	53	0,0953	3,06	0,05	3,011	1,6	301	732	0,13656
17	0,01	47,9	12,11	9443	62	0,0953	3,06	0,06	3,003	1,9	300	3145	0,03180
18	0,01	47,9	12,11	1875	0,003	0,0953	3,06	0,00	3,062	0,0	306	612	0,16329



### APÊNDICE 3

Tabela 21: Refletividade de telhas cerâmicas

Material	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média
Telha cerâmica natural	0,48	0,47	0,49	0,48
Telha cerâmica impermeabilizada	0,44	0,46	0,47	0,46

Tabela 22: Refletividade de telhas de fibrocimento

Material	Média
Fibrocimento pintado de cinza	0,31
Fibrocimento natural	0,4
Papel branco	0,85
Superfície preta	0,04
Fibrocimento limpo superfície externa	0,4
Fibrocimento limpo superfície interna	0,34



## APÊNDICE 4

- a) Temperatura superficial das telhas, do ático e da superfície inferior do forro para os dias 3, 4 e 5 de setembro de 2017. Este período foi utilizado para estudar o efeito da adsorção ao vapor da água no desempenho térmico de telhas cerâmicas.

Figura 151: Temperatura superficial das telhas

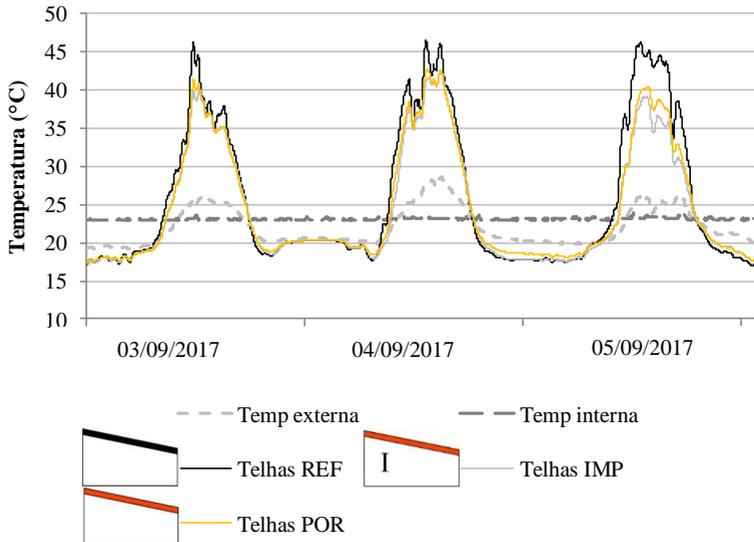


Figura 152: Temperatura do ar no ático

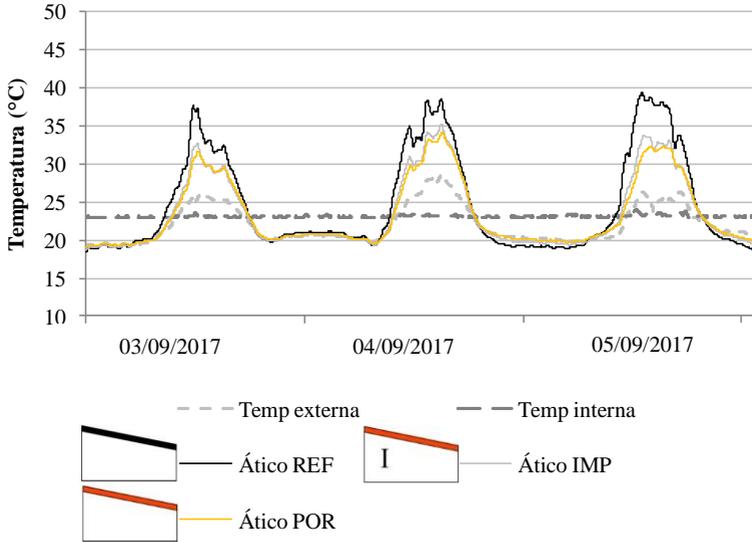
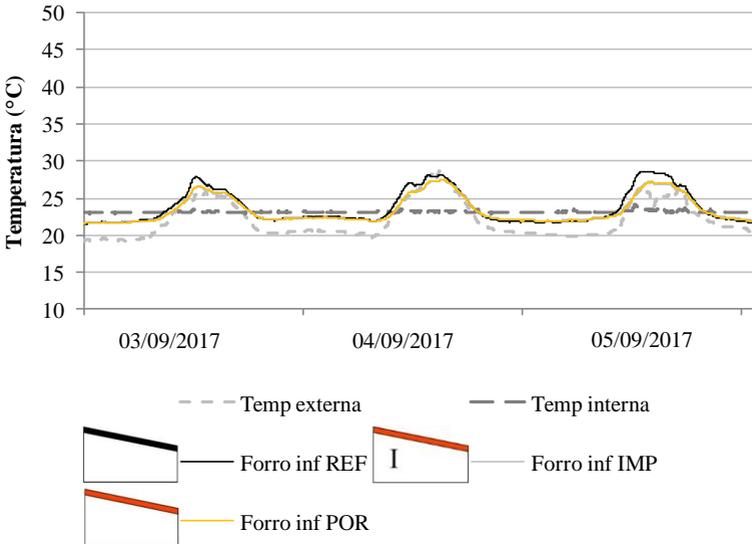


Figura 153: Temperatura da superfície inferior do forro



b) Temperatura superficial das telhas, do ático e da superfície inferior do forro para os dias 21 e 22 de julho de 2017, o qual foi seleccionado para estudar o efeito da condensação da água no desempenho térmico da cobertura.

Figura 154: Temperatura superficial das telhas

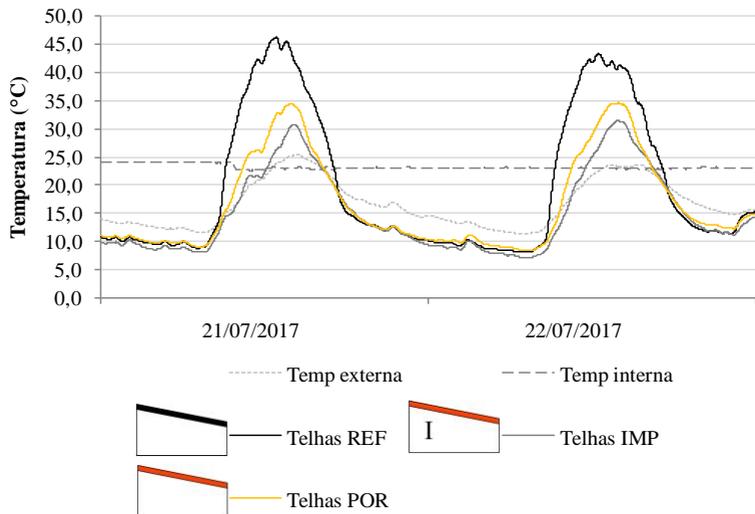


Figura 155: Temperatura do ar no ático

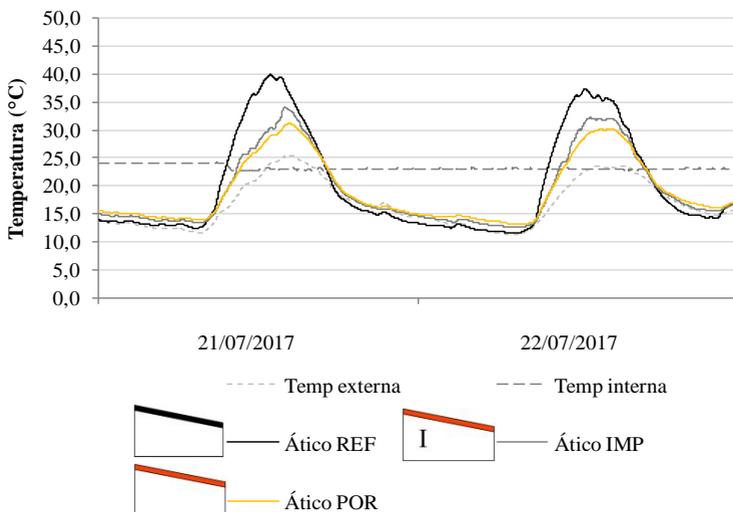
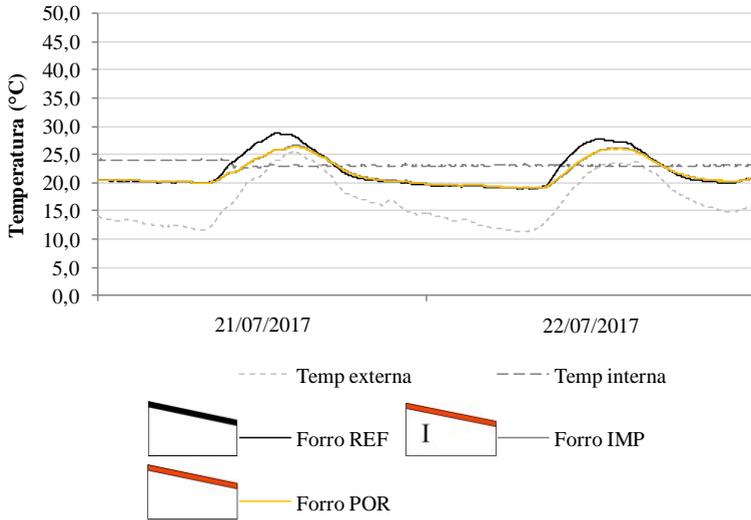


Figura 156: Temperatura da superfície inferior do forro



- c) Temperatura superficial das telhas, do ático e da superfície inferior do forro, para os dias 21 e 22 de julho de 2017. O período acima foi utilizado para estudar o efeito da condensação da água no desempenho térmico da cobertura.

Figura 157: Temperatura superficial das telhas

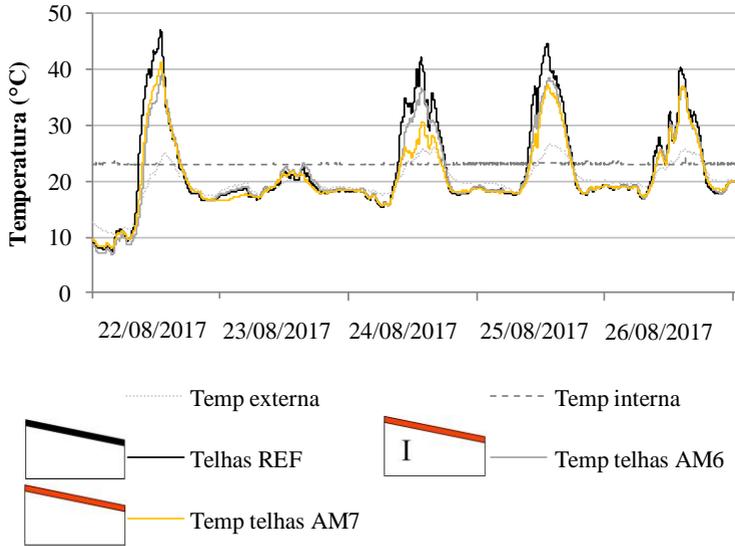


Figura 158: Temperatura do ar no ático

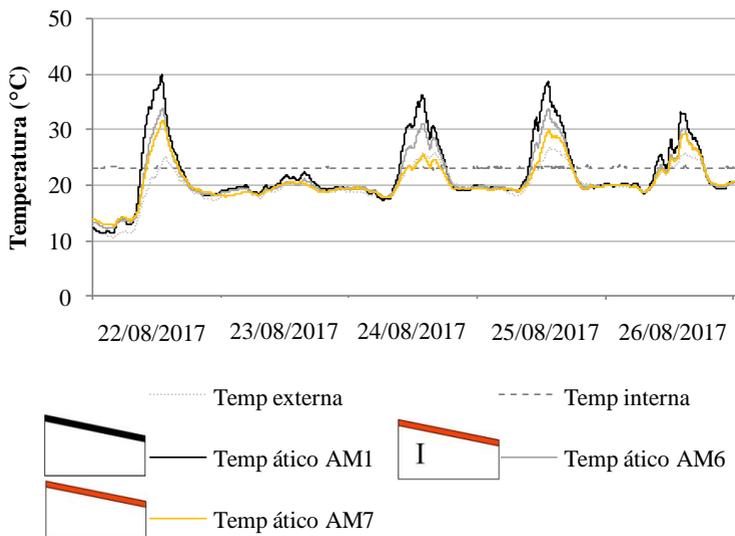
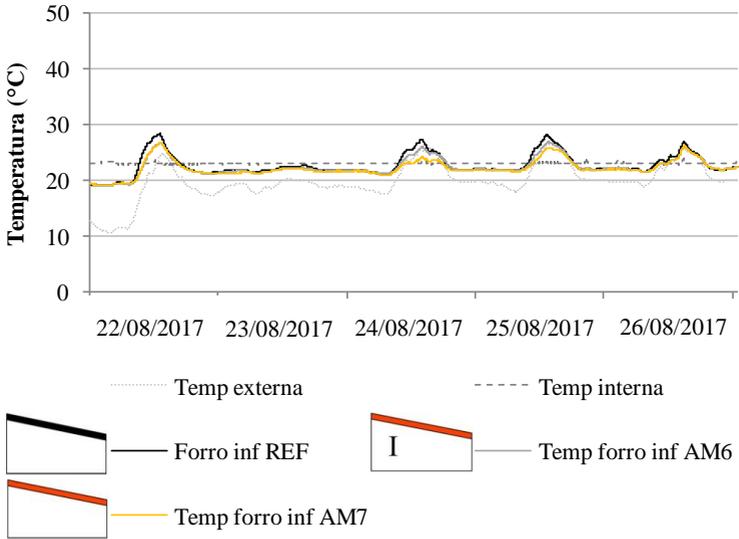


Figura 159: Temperatura da superfície inferior do forno



## APÊNDICE 5

A incerteza nas medições foi avaliada através da análise de incerteza do tipo B, obtida através das incertezas fornecida por catálogo, certificados de calibração. A equação utilizada é a 61. O fator de abrangência (k) depende da forma de como foi obtida a incerteza  $u_i$ . No caso desta pesquisa o fator de abrangência considerado (K) é 2.

$$u = \frac{u_i}{k} \quad (61)$$

onde:

u = incerteza padrão

$u_i$  = incerteza de uma das fontes avaliadas (obtida de catálogos, etc)

k = fator de abrangência

Calculou-se a incerteza combinada em função de termos mais de uma fonte de incerteza, e neste caso é calculada conforme a equação 61. Para padronizar as unidades de medição, utiliza-se a equação 62.

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \quad (61)$$

$$u_c = \sqrt{\left(\frac{\partial f}{\partial x_1} \cdot u(x_1)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_2} \cdot u(x_2)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_3} \cdot u(x_3)\right)^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial x_4} \cdot u(x_4)\right)^2 + \dots} \quad (62)$$

onde:

$\partial f / \partial x$  = coeficiente de sensibilidade

$u(x_1), u(x_2)$  = são as incertezas calculadas pela equação 61.

Analisou-se a incerteza na resistência térmica, cuja equação está mostrada na equação 63. Assim, a análise incerteza está relacionada com a medição da temperatura, que ocorreu através do uso dos termopares e a incerteza ( $u_i$ ) fornecida por catálogos é de 0,1°C, e com os transdutores de fluxo de calor, os quais possuem a incerteza relacionada com a constante de calibração (incerteza de 2%) e com a incerteza de medição do multímetro (2%).

$$R = \frac{\Delta T}{q} \quad (63).$$

onde,

R= resistência térmica,

$\Delta T$  = diferença de temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ )

q = densidade de fluxo de calor ( $\text{W}/\text{m}^2$ )

$$R = \frac{\Delta T}{c \cdot V}$$

onde:

c = constante de calibração (=0,038 ( $\text{W}/\text{m}^2$ )/ ( $\text{W}/\text{m}^2$ )/microV),

V = tensão lida no multímetro (= 480 microV).

Para calcular a incerteza, selecionou-se dados de diferença de temperatura de um dia (30/06/2017, às 10horas e 34 minutos), cujo valor foi de 5,2  $^{\circ}\text{C}$ . **Aplicando as equações acima, encontrou-se um erro de medição do tipo B de 2,8%.**