

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil

ESTUDO EXPERIMENTAL DO
DESEMPENHO TÉRMICO DE COBERTURAS PLANAS
– VEGETAÇÃO E TERRAÇO –

MARIA TEREZA FERNANDES POUHEY

Dissertação para obtenção do título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre
1998

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil

ESTUDO EXPERIMENTAL DO
DESEMPENHO TÉRMICO DE COBERTURAS PLANAS
- VEGETAÇÃO E TERRAÇO -

MARIA TEREZA FERNANDES POUHEY

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil – CPGEC, como parte dos requisitos para a obtenção do título de *Mestre em Engenharia*

Área de Concentração: Construção

Porto Alegre

1998

Esta dissertação foi julgada adequada para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e aprovada em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador:

Prof. Miguel Aloysio Sattler, PhD
Universidade de Sheffield, UK

Co-Orientador:

Prof. Paulo S. Schneider, Dr.
Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, França

Banca Examinadora:

Prof. Fernando Oscar Ruttkay Pereira, PhD
Universidade de Sheffield, UK

Prof. Heitor da Costa Silva, PhD
Architectural Association, School of Architecture, Londres, UK

Prof. Américo Campos Filho, Dr.
Escola Politécnica – USP, Brasil

Prof^a. Denise C. C. Dal Molin, Dr.
Coordenadora do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil

Porto Alegre, novembro de 1998

Aos meus pais, de coração

Ao Carlos Eduardo e à Mariana, com carinho

Ao Carlos, com amor

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Dr. Miguel A. Sattler, por sua orientação, incentivo e indispensável auxílio, dispensados no decorrer deste trabalho.

Ao prof. Dr. Paulo S. Schneider, pelas idéias e contribuição ao experimento, e pelo apoio e incentivo dados durante todo o período de realização do mesmo.

Ao prof. Dr. Francisco Neto de Assis, por suas sugestões e pelo seu interesse e empenho na liberação da área onde foi construída a bancada experimental.

Ao prof. Dr. Eloy Pauletto, por sua valiosa contribuição e indispensável auxílio no monitoramento do teor de água do solo, além do empréstimo de equipamentos.

Ao engenheiro civil João Francisco F. Pouey, um dos meus queridos irmãos, pelo indispensável apoio na execução da bancada experimental e por sua dedicação a esta tarefa.

Ao Dr. Sílvio Stanimetz, Coordenador da Estação Agroclimatológica do convênio UFPel/EMBRAPA, pela liberação de espaço para a construção da bancada experimental junto a esta estação.

Aos profs. Dr. Carlos Formoso e Dr. Daniel Riera e ao engenheiro César Prieb, por viabilizarem, de uma forma ou de outra, a parte experimental deste trabalho.

Aos colegas da turma de 1994 do NORIE, pelo coleguismo e espírito de grupo, em especial às amigas Nara Ione M. Schimitt e Aglae Maria S. Boemeke, cujo apoio e amizade ficaram demonstrados ao longo destes anos.

Aos amigos, familiares e todos aqueles que me incentivaram e/ou colaboraram de algum modo na realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VII
LISTA DE TABELAS	XI
RESUMO	XIV
ABSTRACT	XV
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. USO DE VEGETAÇÃO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO	3
2.2. COBERTURAS COM VEGETAÇÃO.....	6
2.2.1. <i>Aspectos Construtivos</i>	10
2.2.2. <i>Comportamento Térmico</i>	17
2.2.3. <i>Irrigação</i>	19
2.2.4. <i>Manutenção</i>	20
2.2.5. <i>Custos</i>	20
2.3. COBERTURAS COM TERRAÇO.....	22
2.3.1. <i>Aspectos Construtivos</i>	22
2.3.2. <i>Manutenção</i>	25
2.3.3. <i>Patologias</i>	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	26
3.1. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO.....	26
3.1.1. <i>Localização do Experimento</i>	26
3.1.2. <i>Descrição da Bancada Experimental</i>	27
3.2. VARIÁVEIS MEDIDAS	36
3.2.1. <i>Medidas de Temperatura</i>	38
3.2.2. <i>Medidas de Radiação Solar</i>	44
3.2.3. <i>Medidas de Umidade do Solo</i>	46
3.3. MÉTODOS E INCERTEZA DE MEDIÇÃO.....	50
3.3.1. <i>Medições</i>	50
3.3.2. <i>Método Estatístico</i>	51
3.3.3. <i>Método Gravimétrico</i>	53
3.3.4. <i>Incerteza de Medição</i>	54
3.4. MEDIÇÕES PRELIMINARES.....	55

4. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE DOS DADOS	57
4.1. ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE VERÃO.....	57
4.1.1. <i>Dados Climáticos</i>	58
4.1.2. <i>Dados da Cobertura com Vegetação</i>	61
4.1.3. <i>Dados da Cobertura com Terraço</i>	72
4.1.4. <i>Análise Estatística dos Dados</i>	81
4.1.5. <i>Análise Comparativa entre as Coberturas</i>	84
4.2. ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE INVERNO.....	98
4.2.1. <i>Dados Climáticos</i>	100
4.2.2. <i>Dados da Cobertura com Vegetação</i>	100
4.2.3. <i>Dados da Cobertura com Terraço</i>	108
4.2.4. <i>Análise Estatística dos Dados</i>	114
4.2.5. <i>Análise Comparativa entre as Coberturas</i>	117
4.3. ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO TÉRMICO DAS COBERTURAS NO VERÃO E NO INVERNO.....	127
4.3.1. <i>Temperaturas Superficiais</i>	127
4.3.2. <i>Retardo e Amortecimento Térmicos</i>	134
4.3.3. <i>Temperatura do Ar Interno</i>	135
5. CONCLUSÕES	138
5.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES	138
5.1.1. <i>Da montagem experimental:</i>	138
5.1.2. <i>Da análise do desempenho térmico de verão:</i>	139
5.1.3. <i>Da análise de desempenho térmico de inverno:</i>	140
5.1.4. <i>Da análise comparativa do desempenho térmico das coberturas no verão e no inverno:</i>	141
5.2. CONCLUSÕES GERAIS.....	142
5.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	144
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	145

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 A – Exemplos de coberturas verdes existentes	7
Figura 1 B – Exemplos de coberturas verdes existentes	8
Figura 2 - Perfil genérico de uma cobertura com vegetação	10
Figura 3 - Perfil genérico de uma cobertura com terraço.....	23
Figura 4 - Croqui do local de implantação do experimento	28
Figura 5 - Vista da bancada experimental durante o período de medições	28
Figura 6 - Projeto da bancada experimental	29
Figura 7 - Fases inicial e intermediária de construção da bancada experimental.....	32
Figura 8 - Fase final de construção da bancada experimental.....	33
Figura 9 - Detalhe das camadas constituintes da cobertura com vegetação.....	34
Figura 10 - Detalhe das camadas constituintes da cobertura com terraço.....	35
Figura 11 - Detalhe das lajes com a impermeabilização já executada.	35
Figura 12 - Conjunto de equipamentos instalados para aquisição e registro de dados	37
Figura 13 - Detalhe dos sensores tipo Pt 100 disponíveis	40
Figura 14 - Detalhe da conexão a quatro fios dos Pt 100.....	40
Figura 15 - Pontos de instalação dos sensores de temperatura.....	41
Figura 16- Instalação do sensor de temperatura na interface solo-manta geotêxtil.....	43
Figura 17 - Instalação dos sensores de temperatura superficial externa do terraço.	43
Figura 18 - Detalhe dos dispositivos de proteção dos sensores de temperatura do ar.....	45
Figura 19 - Vista dos piranômetros instalados	45
Figura 20 - Esquema das partes constituintes de um tensiômetro.....	47
Figura 21 - Retirada de amostra do solo.....	49
Figura 22 - Reposição de água no sistema	50
Figura 23 - Gráfico de temperatura do ar externo nas semanas selecionadas de verão	60
Figura 24 - Gráfico de radiação solar total e difusa nas semanas selecionadas de verão.....	60
Figura 25 - Gráfico das temperaturas superficiais nas camadas monitoradas da cobertura com vegetação, nas semanas selecionadas de verão.....	61
Figura 26 - Gráfico das diferenças de temperaturas superficiais nas camadas constituintes da cobertura com vegetação, nas semanas selecionadas de verão	67

Figura 27 - Gráfico de temperaturas do ar externo e interno e temperatura de globo, na cobertura com vegetação, nas semanas selecionadas de verão.....	66
Figura 28 - Gráfico das diferenças de temperaturas do ar externo e interno da cobertura com vegetação, nas semanas selecionadas de verão.....	69
Figura 29 - Curva de ajuste aos pontos conhecidos (potencial mátrico x umidade) e sua respectiva equação	70
Figura 30 - Gráfico dos dados do potencial mátrico e respectiva umidade volumétrica do solo empregado na cobertura verde, nos períodos de verão	71
Figura 31 - Dados de radiação solar global diária, umidade do solo e diferença de temperaturas nas superfícies da camada de solo, nos períodos de verão.....	71
Figura 32 - Gráfico das temperaturas superficiais nas camadas monitoradas da cobertura com	73
Figura 33 - Gráfico das diferenças de temperaturas superficiais, nas camadas constituintes da cobertura com terraço, nas semanas selecionadas de verão	77
Figura 34 - Gráfico de temperaturas do ar externo e interno e temperatura de globo, na cobertura com terraço, nas semanas selecionadas de verão	78
Figura 35 - Gráfico das diferenças de temperaturas do ar externo e interno da cobertura com terraço, nas semanas selecionadas de verão.....	81
Figura 36 - Gráfico das temperaturas superficiais externas das duas coberturas, confrontadas com a temperatura do ar externo e com a radiação solar global diária, nas semanas selecionadas de verão	84
Figura 37 - Gráfico das temperaturas na camada de proteção mecânica da impermeabilização de cada cobertura, nas semanas selecionadas de verão.....	88
Figura 38 - Gráfico das temperaturas superficiais internas das duas coberturas, confrontadas com a temperatura do ar externo, nas semanas selecionadas de verão	91
Figura 39 - Gráfico dos coeficientes de amortecimento térmico das coberturas com vegetação e com terraço, no período de verão.....	96
Figura 40 - Gráfico comparativo das temperaturas do ar externo e interno sob as duas coberturas, nas semanas selecionadas de verão	97
Figura 41 - Gráfico de temperatura do ar externo, na semana selecionada de inverno.....	100
Figura 42 - Gráfico de radiação solar total e difusa, na semana selecionada de inverno	100
Figura 43 - Gráfico das temperaturas superficiais nas camadas monitoradas da cobertura com vegetação, na semana selecionada de inverno	101

Figura 44 - Gráfico das diferenças de temperaturas superficiais nas camadas constituintes da cobertura com vegetação, na semana selecionada de inverno...	104
Figura 45 - Gráfico de temperaturas do ar externo e interno e temperatura de globo, na cobertura com vegetação, na semana analisada de inverno.....	105
Figura 46 - Gráfico das diferenças de temperaturas do ar externo e interno da cobertura com vegetação na semana selecionada de inverno.....	107
Figura 47 - Gráfico dos dados do potencial mátrico e respectiva umidade volumétrica do solo empregado na cobertura verde, durante a semana analisada no período de inverno	107
Figura 48 - Gráfico de radiação solar global diária, umidade do solo e diferença de temperaturas nas superfícies da camada do solo, durante o período de inverno analisado	108
Figura 49 - Gráfico das temperaturas superficiais nas camadas monitoradas da cobertura com terraço, na semana selecionada de inverno.....	109
Figura 50 - Gráfico das diferenças de temperaturas superficiais nas camadas constituintes da cobertura com terraço, na semana selecionada de inverno.....	112
Figura 51 - Gráfico de temperaturas do ar externo e interno e temperatura de globo, na cobertura com terraço, na semana selecionada de inverno.....	112
Figura 52 - Gráfico das diferenças de temperaturas do ar externo e interno da cobertura com terraço, na semana selecionada de inverno.....	114
Figura 53 - Gráfico comparativo das temperaturas superficiais externas das duas coberturas e do ar externo, bem como a radiação solar global diária. Período: 31/05 a 06/06.....	117
Figura 54 - Gráfico comparativo das temperaturas superficiais na camada de proteção mecânica da impermeabilização de cada cobertura. – Período: 31/05 a 06/06.	120
Figura 55 - Gráfico comparativo das temperaturas superficiais internas das duas coberturas, confrontadas com a temperatura do ar externo. Período: 31/05 a 06/06	122
Figura 56 - Gráfico dos coeficientes de amortecimento térmico das coberturas com vegetação e terraço, no período analisado durante o inverno.....	125
Figura 57 - Gráfico comparativo das temperaturas do ar externo e interno sob as duas coberturas – Período: 31/05 a 06/06	125

Figura 58 - Gráfico comparativo das temperaturas superficiais externas de ambas as coberturas, confrontadas com a temperatura do ar externo e com a radiação solar global diária, nos períodos de verão e de inverno.....	129
Figura 59 - Gráfico comparativo da evolução das temperaturas superficiais na camada de proteção mecânica da impermeabilização de ambas as coberturas, nos períodos de verão e de inverno	131
Figura 60 - Gráfico comparativo da evolução das temperaturas superficiais internas de ambas as coberturas, nos períodos de verão e de inverno	133
Figura 61 - Gráfico comparativo das temperaturas do ar externo e interno sob as duas coberturas, nos períodos de verão e de inverno	137

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Custos unitários adicionais em relação à estrutura e à estrutura mais acabamento, em prédios de 4 e 10 pavimentos, considerando coberturas planas pavimentadas e, com cobertura vegetal.....	21
Tabela 2 - Valores das propriedades físicas e térmicas dos materiais.....	36
Tabela 3 - Valores de incerteza de medição para os sensores usados.....	55
Tabela 4 - Dados climatológicos dos meses de janeiro e março / 96.....	58
Tabela 5 - Dados climáticos da semana 08 a 14 de janeiro / 96.....	59
Tabela 6 - Dados climáticos da semana 07 a 13 de março / 96.....	59
Tabela 7 - Temperaturas superficiais máximas e mínimas nas camadas constituintes da cobertura com vegetação	62
Tabela 8 - Temperaturas superficiais máximas e mínimas nas camadas constituintes da cobertura com vegetação	63
Tabela 9 - Valores máximos e mínimos das temperaturas do ar externo e interno na cobertura com vegetação - Semana de 08 a 14 de janeiro / 96.....	67
Tabela 10 - Valores máximos e mínimos das temperaturas do ar externo e interno na cobertura com vegetação - Semana de 07 a 13 de março / 96.....	67
Tabela 11 - Temperaturas superficiais máximas e mínimas nas camadas constituintes da cobertura com terraço	73
Tabela 12 - Temperaturas superficiais máximas e mínimas nas camadas constituintes da cobertura com terraço	74
Tabela 13 – Valores máximos e mínimos das temperaturas do ar externo e interno na cobertura com terraço – Semana em janeiro / 96	79
Tabela 14 - Valores máximos e mínimos das temperaturas do ar externo e interno na cobertura com terraço - Semana em março / 96	79
Tabela 15 - Valores máximos e mínimos da temperatura do ar externo e temperaturas superficiais externas de ambas as coberturas, bem como horário de ocorrência dos mesmos e radiação solar global diária - Semana em janeiro / 96	84

Tabela 16 - Valores máximos e mínimos da temperatura do ar externo e temperaturas superficiais externas de ambas as coberturas, bem como horário de ocorrência dos mesmos e radiação solar global diária - Semana em março/96.....	85
Tabela 17 – Valores máximos e mínimos das temperaturas superficiais na camada de proteção mecânica da impermeabilização, em ambas as coberturas - Período: 08 a 14 de janeiro / 96.....	89
Tabela 18 – Valores máximos e mínimos das temperaturas superficiais na camada de proteção mecânica da impermeabilização, em ambas as coberturas - Período: 07 a 13 de março / 96.....	89
Tabela 19 - Valores máximos e mínimos da temperatura do ar externo e temperaturas superficiais internas de ambas as coberturas, bem como horário de ocorrência dos mesmos - Semana em janeiro / 96.....	92
Tabela 20 - Valores máximos e mínimos da temperatura do ar externo e temperaturas superficiais internas de ambas as coberturas, bem como horário de ocorrência dos mesmos - Semana em março / 96.....	93
Tabela 21 - Dados climatológicos do mês de junho / 96.....	99
Tabela 22 - Dados climáticos da semana de 31 de maio a 06 de junho / 96.....	99
Tabela 23 - Temperaturas superficiais máximas e mínimas nas camadas constituintes da cobertura com vegetação - Semana de 31/05 a 06/06/ 96	101
Tabela 24- Valores máximos e mínimos das temperaturas do ar externo e interno na cobertura com vegetação - Semana de 31/05 a 06/06/96.	105
Tabela 25 – Temperaturas superficiais máximas e mínimas nas camadas constituintes da cobertura com terraço Semana de 31/05 a 06/06/96.....	109
Tabela 26- Valores máximos e mínimos das temperaturas do ar externo e interno na cobertura com terraço - Semana de 31/05 a 06/06/96	113
Tabela 27 - Valores máximos e mínimos da temperatura do ar externo e temperaturas superficiais externas de ambas as coberturas, bem como horário de ocorrência dos mesmos e radiação solar global diária - - Semana de 31/05 a 06/06/96.....	117
Tabela 28 - Valores máximos e mínimos das temperaturas superficiais na camada de proteção mecânica da impermeabilização, em as ambas coberturas - Semana de 31/05 a 06/06/96	120

Tabela 29 - Valores máximos e mínimos da temperatura do ar externo e temperaturas superficiais internas de ambas as coberturas, bem como horário de ocorrência dos mesmos - Semana de 31/05 a 06/06/96.....	122
Tabela 30 – Valores extremos das temperaturas superficiais, em ambas as coberturas, nos períodos de verão e de inverno.....	127
Tabela 31 – Amplitudes diárias e total das temperaturas superficiais, em ambas as coberturas, nos períodos de verão e de inverno.....	127
Tabela 32 – Valores máximos e mínimos da temperatura do ar interno, em ambas as coberturas, nos períodos de verão e de inverno.....	135
Tabela 33 – Amplitudes diárias e total da temperatura do ar interno, em ambas as coberturas, nos períodos de verão e de inverno.....	135

RESUMO

O presente trabalho é um estudo experimental do comportamento térmico de dois tipos de coberturas planas: cobertura verde e terraço. Através do monitoramento de uma bancada experimental, construída na cidade de Pelotas, RS, foram obtidos conjuntos de dados relativos a períodos de uma semana, sendo uma em período de verão e a outra no inverno. São descritos a bancada experimental e os métodos usados, assim como apresentados os sensores e equipamentos empregados.

Na análise do desempenho térmico foram comparadas as temperaturas superficiais obtidas em três camadas diferentes de cada cobertura, bem como os dados de temperatura do ar, registrados no exterior e no interior da bancada, em câmaras sob as coberturas em estudo. Quanto às temperaturas superficiais, a externa, registrada na cobertura verde, apresentou menor amplitude de variação, nos dois períodos analisados; a interna foi menor no verão, e praticamente igual à do terraço, no inverno. Quanto à temperatura do ar interno, no verão, a da cobertura verde foi sempre menor e, no inverno, em dias de frio mais intenso, ela tornou-se superior ou igual à temperatura interna no terraço. A cobertura verde apresentou maior capacidade de amortecer a onda térmica externa, e maior retardo térmico; além disso, todos os seus materiais constituintes sofreram menores oscilações de temperatura.

ABSTRACT

The present work compares the thermal behaviour of a traditional flat roof with that of a flat green roof. An experimental work was developed by means of the monitoring of the two types of roof during a summer and a winter period of one week. The work describes the experimental setting as well as the methods and equipment used.

The thermal assessment was made through the comparison of the temperatures of three layers of each of the roofs, that were also compared to the external temperature and to the indoor temperature below the roof.

Both in summer and in winter the surface temperature on the top of the green roof was the one with lowest amplitude range. The surface temperature under the green roof was the lowest during the summer and almost equal to the one under the traditional flat roof during the winter. In summertime, again the indoor temperature under the green roof was always below that under the other roof. The same happened during most of the winter, being above the indoor temperature of the traditional roof only on the coldest days. The green roof showed a higher time delay and a higher decrement factor and all its components showed a smaller temperature range.

1. INTRODUÇÃO

O projeto de uma construção leva em conta inúmeros parâmetros, de tal forma que a edificação resultante, além de adequada ao uso, deve ser segura, higiênica, confortável, durável e econômica. Nem sempre as decisões de projeto são coerentes com todos os estes objetivos, nem é fácil a tarefa de harmonizá-los. A qualidade “confortável” envolve vários aspectos, desde as condições higrotérmicas, acústicas e ergonômicas, até o conforto visual e tátil, além da pureza do ar. Em relação ao conforto higrotérmico, um fator importante são os ganhos e trocas de calor pelos fechamentos das construções. Este trabalho aborda o comportamento térmico de dois tipos de fechamentos usados em coberturas de edificações.

A cobertura é um elemento da construção muito exposto à radiação solar, portanto responsável por grande parcela do fluxo de calor transferido ao ambiente interno. Durante o dia, a cobertura sofre com a insolação e, à noite, com um resfriamento muito rápido em função das trocas de calor por radiação de onda longa com o céu. Além disso, o Brasil possui quase a totalidade de seu território sujeito à intensa e abundante insolação por boa parte do ano. Sendo assim, a cobertura deveria ser a parte da construção mais protegida em termos de isolamento e inércia térmica; entretanto, na maioria das vezes, é o elemento menos protegido.

Este trabalho tem o objetivo de estudar, experimentalmente o comportamento térmico de coberturas planas, analisando comparativamente os dados obtidos em uma cobertura com vegetação, também chamada de “cobertura verde” e outra, com terraço. A fim de atingir este objetivo, foi construída uma bancada experimental, onde foram monitoradas as duas coberturas propostas, nos períodos de verão e inverno. Além disso, os valores reais obtidos no experimento constituem um banco de dados, que poderá servir para a validação de modelos de simulação.

1 - Introdução

As coberturas verdes constituem uma alternativa que não é idéia nova, uma vez que os primeiros jardins em coberturas foram executados há milhares de anos e são amplamente utilizadas na Europa. No entanto, com a atual consciência ecológica e a preocupação com a qualidade do meio ambiente e o modo de vida dos indivíduos, surge uma tendência de estímulo e apoio à implantação de novas coberturas com vegetação. Em países como Canadá, Estados Unidos, Alemanha, França, Itália e outros verifica-se que esta tendência já é uma realidade, onde existem grupos organizados com o objetivo de contribuir para promoção e divulgação das coberturas verdes, a exemplo do “Rooftop Garden Resource Group”, de Toronto.

As coberturas verdes apresentam várias vantagens, de ordem técnica, estética ou psicológica, proporcionando ao projetista enorme potencial a ser desenvolvido e explorado. Tais coberturas podem variar desde um simples gramado a um sofisticado jardim com plantas exóticas. Entre as vantagens técnicas, cita-se o desempenho térmico, objeto desta pesquisa.

O presente trabalho compreende, além deste, mais quatro capítulos. No capítulo 2 - Revisão Bibliográfica – são revistas as vantagens, desvantagens e os aspectos construtivos das coberturas verdes e dos terraços. No terceiro, são definidas as características do experimento, tratando da construção da bancada, dos procedimentos e equipamentos empregados. No quarto, são apresentados os dados obtidos e feitas análises comparativas de desempenho, em relação a temperaturas superficiais e do ar, para as situações de verão e inverno. O quinto e último capítulo apresenta as conclusões e recomendações para futuras pesquisas.

Este trabalho pretende trazer uma contribuição ao estudo do desempenho de coberturas planas, em especial às Coberturas Verdes, sem esgotar-se em si mesmo.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem por objetivo caracterizar os dois tipos de cobertura em estudo, ao mesmo tempo em que tenta estabelecer um paralelo entre elas. Existe a necessidade de caracterizar, de maneira mais específica, a cobertura com vegetação, pois esta é pouco conhecida em nosso meio. O texto aborda vários aspectos construtivos, como questões de impermeabilização, isolamento térmico e carga na estrutura. Além dos aspectos construtivos, foram revistos aspectos de manutenção, patologias, reparos e outros. Por ser o tema do trabalho, o desempenho térmico é analisado de forma particular, especialmente no que se relaciona à sua vinculação às coberturas com vegetação, que já vêm sendo estudadas por vários autores, em diferentes países. Com relação aos terraços, poucos estudos foram encontrados.

2.1. USO DE VEGETAÇÃO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO

É amplamente conhecido que o arranjo de plantas vivas, incluindo árvores e grama, em torno de construções, não tem somente efeito psicológico, mas produz, também, um microclima favorável em torno destas edificações. Entretanto, segundo Hoyano (1984), poucos dados têm sido levantados para análise quantitativa do efeito térmico no ambiente arquitetônico ou da economia de energia que esta vegetação proporciona. Assim, quando arquitetos e engenheiros projetam um ambiente térmico, necessitam de parâmetros para avaliação, que possa indicar o efeito climático do uso de plantas na edificação e na área urbana.

2 - Revisão Bibliográfica

A nível urbano, as massas verdes também são responsáveis por um efeito de resfriamento no microclima das áreas do seu entorno. Vários autores têm estudado o efeito térmico de áreas verdes no meio urbano.

Honjo e Takakura (1991) estudaram esta influência através de simulação, chegando à conclusão de que são preferíveis pequenas áreas verdes em espaçamentos menores, para que o efeito do resfriamento nas áreas do entorno seja mais distribuído.

Kawashima (1991) estudou o efeito da densidade de vegetação na temperatura superficial, durante o inverno, em áreas urbanas e suburbanas, baseado em imagens de alta resolução de satélite, em dias e noites claros. Concluiu que, em áreas urbanas, quando a vegetação é escassa, a variação de temperatura é pequena, porém é grande quando a vegetação é abundante.

Johnston e Newton (1991) citam algumas vantagens que a presença de vegetação traz ao meio ambiente. Listam, além de vantagens de efeito psicológico, outros benefícios, como a qualidade do ar e a redução do efeito das “ilhas de calor” e do volume de águas pluviais escoadas, garantindo, ainda, que a implantação de áreas verdes é um bom investimento.

Entre os benefícios psicológicos trazidos pela presença de árvores e vegetação no meio urbano, podem ser citados: a introdução de elementos de escala natural entre ruas e prédios, a percepção da mudança de estações, que produz uma ligação psicológica com o campo e o belo visual do espaço construído.

Quanto à qualidade do ar, a presença de árvores nas ruas e avenidas pode filtrar em torno de 85% de partículas suspensas, sendo este percentual reduzido a 40% no inverno, quando as árvores são de folhas caducas. Quanto à redução do volume de águas pluviais escoadas, os autores mencionam que as coberturas com vegetação absorvem 75% da precipitação que cai sobre elas, enquanto, em níveis normais, esta redução seria de 25%. Assim, o risco de alagamento fica minimizado, já que a rede pluvial fica, num primeiro instante, recolhendo as águas que escoam de ruas e outras superfícies impermeáveis. Quanto ao aspecto de investimento, as áreas residenciais e comerciais são mais valorizadas e atrativas quando incorporam espaços verdes. Uma outra vantagem prática, que a vegetação proporciona, é a proteção às superfícies das construções, quando colocada diretamente sobre elas: resulta, daí, também, economia, por tornar a manutenção mais espaçada.

2 - Revisão Bibliográfica

Outros autores, como Matsubara et al. (1991), Saito et al. (1991) e Wilmers (1991), também desenvolveram estudos sobre o influência da vegetação ou áreas verdes no ambiente térmico de áreas urbanas.

A vegetação pode ter uso climático no controle do efeito da radiação solar nas edificações, já que, segundo Costa (1982), a vegetação tem a capacidade de transformar, pela fotossíntese, a energia solar em energia química latente, em forma de compostos de carbono e hidrogênio; além disto, reduz, por seu metabolismo, a incidência da insolação durante o dia, liberando calor durante a noite. Assim, a vegetação pode ser disposta de várias maneiras nas edificações, como revestimento ou sombra, tanto na cobertura, quanto nas paredes e no entorno.

Hoyano (1988), dando seqüência a suas pesquisas, desenvolveu vários experimentos, a fim de estudar o uso de plantas no controle solar e seu efeito climático nas edificações. Os estudos analisaram vários efeitos, tais como: o do sombreamento de pérgolas, com vegetação situadas em pátios; o de heras em paredes com orientação oeste; o de vegetação pendente, como elemento de sombreamento para janelas e sacadas e, também, o do sombreamento de paredes com orientação oeste por um conjunto de árvores dispostas em linha paralela a estas.

No que se refere à edificação, a presença de vegetação pode ser abordada em duas aplicações, isto é, revestindo paredes, as chamadas “paredes verdes” ou nas coberturas - “coberturas verdes” ou “coberturas jardim”.

Autores, como Minke (1986) e Johnston e Newton (1991), afirmam que a crença de que as plantas são inimigas das estruturas das construções e dos revestimentos das paredes é infundada, e justificam, dizendo que uma cobertura de plantas nas fachadas melhora o microclima, além de proteger a fachada contra o sol, a chuva e o vento. Os danos só se verificam, quando a parede já apresenta um processo de deterioração e as plantas podem vir a acelerar tal processo, aumentando fissuras e desprendendo pedaços de argamassa de reboco, por infiltração das raízes. Todavia, dizem que é preciso tomar cuidado com as heras, pois seu principal impulso é crescer nas reentrâncias, devendo não apresentar fendas a fachada a ser coberta pela vegetação.

Os autores mencionam ainda que uma fachada de cobertura maciça, com plantas trepadeiras, apresenta vantagens em termos de microclima e influencia positivamente o clima

2 - Revisão Bibliográfica

interior da edificação. Como consequência, vários resultados positivos são citados, tais como: barreira térmica pelo “efeito de almofada”; redução das perdas térmicas, através de barreira para os ventos; função de atenuação do impacto dos raios solares, através da evaporação, absorção e reflexão destes raios; purificação da atmosfera, por reduzir a concentração de aerossóis, poeira e outras partículas de sujeira; enriquecimento da atmosfera com umidade; abrigo da fachada a fortes variações de temperatura, raios ultravioleta e pancadas de chuva e outros, com isso aumentando a vida útil da pintura e do reboco. São necessários vários anos para que se consiga uma cobertura maciça de uma fachada, com plantas trepadeiras. O uso destas plantas, além de poder melhorar um bom projeto, pode também disfarçar um mau projeto. A melhora do visual é um benefício óbvio, acrescido da vantagem de uma variedade de aromas naturais.

2.2. COBERTURAS COM VEGETAÇÃO

Cobertura com vegetação ou cobertura verde é, segundo Tandy et al. (1976) e Morgado (1995), “uma área de vegetação sobre um substrato impermeável, em qualquer nível, separado do solo natural por uma estrutura artificial”. A figura 1 mostra exemplos de coberturas verdes existentes. As coberturas verdes, segundo Johnston e Newton (1991), Krolkiewicz (1992) e Morgado (1995), podem ser classificadas em dois grupos: intensiva ou tradicional e extensiva ou ecológica

O método intensivo ou tradicional é aquele em que existe uma camada profunda de solo (acima de 200 mm) e, portanto, condições favoráveis para o desenvolvimento das plantas, além de um sistema de irrigação. O método extensivo é o em que a camada de solo é pequena (menor que 200 mm), desenvolvendo-se as plantas se em condições estressantes, sem sistema de irrigação, ocorrendo esta eventualmente.

Comparando um método com o outro, o método intensivo apresenta a possibilidade de grande diversificação de plantas, podendo simular jardins e tornar-se um grande atrativo visual. Em contraposição, constitui método de alto custo, por requerer sistemas de irrigação e drenagem, acarretando necessidade de água, energia, materiais e etc. Possibilitando diversas utilizações da cobertura, poderá compor: áreas com terraços, espaços de alimentação, esporte, contemplação, etc..

2 - Revisão Bibliográfica



Figura 1 A – Exemplos de coberturas verdes existentes

2 - Revisão Bibliográfica



Figura 1 B – Exemplos de coberturas verdes existentes

2 - Revisão Bibliográfica

O método extensivo, apropriado somente para gramíneas, ervas e relva, apresenta aspecto mais natural e investimento relativamente mais baixo. Por exigir menor custo de manutenção, é apropriado a grandes áreas, em que a vegetação se desenvolve espontaneamente.

Quanto à inclinação, as coberturas com método extensivo admitem variação de 0° a 30° , enquanto as intensivas são adequadas para inclinações de 0° a $1,2^{\circ}$. Em função da maior espessura de solo e da camada drenante, o método intensivo apresenta a desvantagem de uma carga elevada para a estrutura, ao passo que o método extensivo gera pequeno carregamento, não exigindo reforço de estrutura, mais adequado, pois, para projetos de reforma.

As coberturas com vegetação apresentam vantagens, de ordem técnica, estética e psicológica, em relação a outros tipos de coberturas. As vantagens de ordem psicológicas são as mesmas trazidas pela presença de árvores e vegetação no meio urbano, e já foram mencionadas no item anterior. Entre as vantagens de ordem técnica citam-se: o isolamento térmico, o isolamento acústico, a possibilidade de proteger a impermeabilização e de minimizar as patologias em lajes de cobertura, porque é reduzido o gradiente de dilatação térmica. Por fim, acrescentem-se a diminuição e/ou o retardo do volume de águas pluviais escoadas nas redes dos centros urbanos. Ainda outras vantagens podem ser citadas, como as de reduzir a poluição, por filtragem do ar através da vegetação, conservar e estimular a vida silvestre e a diversidade vegetal no meio urbano. Além disso, a estética diferenciada, a alteração do microclima local e o efeito psicológico tornam a paisagem urbana menos árida e com melhor qualidade de vida.

Minke (1986) lista uma série de vantagens apresentadas pelas coberturas verdes: isolamento térmico, através da camada de ar que se forma entre as folhas; redução da perda de calor pelo bloqueamento do vento; isolamento acústico; limpeza do ar por filtragem; efeito refrescante, por evaporação, quando o sol é intenso; redução do movimento vertical do ar sobre os tetos; redução de formação de neblina, por condensação na vegetação; retenção de água; proteção das lajes de cobertura dos raios ultravioleta e variações bruscas de temperatura, com conseqüente aumento da vida útil da estrutura.

2.2.1. Aspectos Construtivos

Criar, com sucesso, uma cobertura verde requer definição clara dos objetivos de projeto, específicos em cada edificação. No entanto, para qualquer projeto, inicialmente alguns aspectos devem ser necessariamente analisados: impermeabilização e sistema de drenagem, implicações no carregamento, irrigação e custo de manutenção.

São diversas as camadas construtivas de uma cobertura verde, citadas por autores como Tandy et al. (1976), Grub (1986), Johnston e Newton (1991): vegetação, camada de solo ou substrato, camada filtrante, camada drenante, proteção contra raízes, impermeabilização, estrutura. Alguns autores, como Krolkiewicz (1992) e Morgado (1995), ainda acrescentam camadas de isolamento térmico e camada de controle de vapor. A figura 2 mostra o perfil genérico de uma cobertura verde.

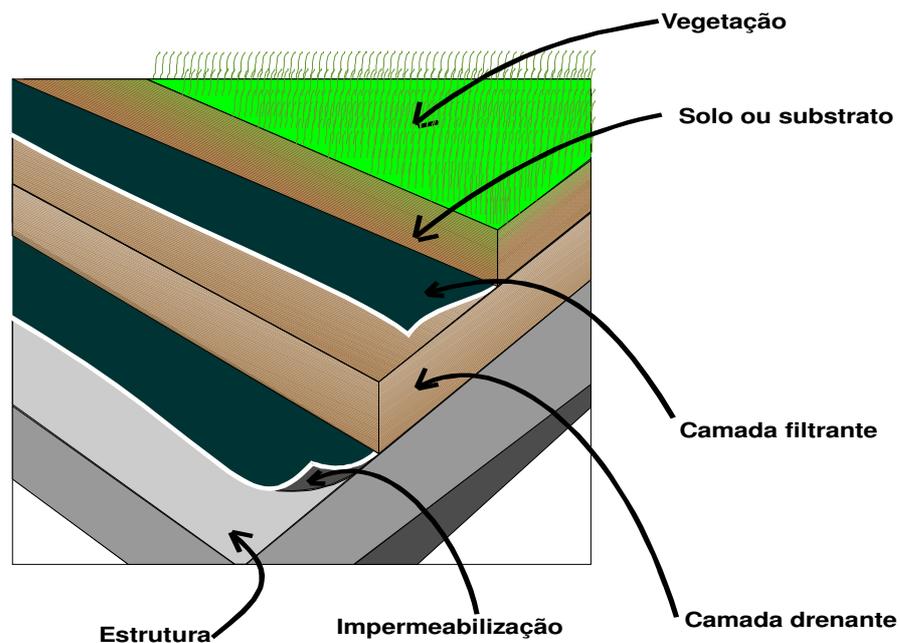


Figura 2 - Perfil genérico de uma cobertura com vegetação

2.2.1.1. Vegetação

A seleção adequada do tipo de vegetação para coberturas verdes deve levar em consideração: tipo de manutenção possível (se haverá ou não irrigação), profundidade do solo, exposição a ventos e correntes de ar e sombreamento ou proteção, contra a chuva, causada por edifícios vizinhos.

2 - Revisão Bibliográfica

Sempre que existirem dúvidas acerca destas condições, a alternativa é utilizar variedades que não requeiram muita umidade. Como as plantas sobre a cobertura ficam expostas, sem proteção ao vento, a intempéries e a substâncias nocivas, além de receber pouco ou nenhum cuidado, convém selecionar plantas robustas, que sejam resistentes a secas e geadas e pouco exigentes quanto à composição do solo.

As plantas nativas são as mais indicadas para o sistema extensivo. Plantas mais sensíveis e exigentes requerem maior cuidado quanto à composição do solo e aos sistemas de irrigação e drenagem, além de exigirem manutenção, sendo indicadas para o sistema intensivo. Vários autores enfatizam a necessidade da assessoria de um especialista, quando se pretende usar vegetação de maior sensibilidade.

2.2.1.2. Solo

A camada de solo, também chamada substrato, é a parte vital de uma cobertura verde, por ser o meio que proporciona nutrientes, água e condições de desenvolvimento para as raízes das plantas.

O solo deve apresentar, segundo Grub (1986) e Johnston e Newton (1991), as seguintes características: boa capacidade de retenção, boa permeabilidade à água, boa retenção de ar, bom *status* de nutrientes, excelente meio para enraizamento, boas propriedades de ancoragem da planta, mínima deterioração orgânica e resistência ao apodrecimento e ao congelamento.

Na maioria das vezes, esta camada é composta de solo vegetal, melhorado com aditivos orgânicos ou minerais, como turfa, húmus, areia, serragem ou barro. Segundo os autores anteriormente citados, uma boa composição pode ser obtida com solo vegetal (4 partes) mais um aditivo mineral (1 parte de areia fina lavada) e mais um aditivo orgânico (1 parte de húmus). Solo argiloso deve ser evitado, a fim de garantir uma boa drenagem.

A presença da areia no solo tende a minimizar os efeitos da compactação constante, ocasionada por circulação de pessoas e máquinas, enquanto a presença do húmus assegura o fornecimento de nutrientes.

2 - Revisão Bibliográfica

Tandy et al. (1976) afirmam que uma composição de solo vegetal e areia tem condições de abrigar distintas formas de vida vegetal em seu período de vida normal, sempre que a manutenção for adequada; tal afirmação é decorrente de sua experiência e de muitos casos conhecidos. Appl e Zink (1994), comentando a instalação de uma cobertura verde em um conjunto de moradias já existentes, sugerem a adição de húmus ao solo vegetal. Grub (1986), Johnston e Newton (1991) também concordam com esta aplicação.

A espessura da camada do substrato é função do tipo de vegetação escolhida. Quanto maior o tamanho das plantas a serem cultivadas, maior será a profundidade necessária ao solo; quanto maior esta profundidade, maior a margem de segurança durante o período de secas ou quando houver descuido de manutenção. Johnston e Newton (1991) sugerem, para um sistema extensivo de cobertura verde, as seguintes profundidades: 10 a 20 mm para musgos e para vegetação que se auto mantém; 30 a 50 mm para suculentas e outras plantas; 50 a 200 mm para gramas e arbustos. No sistema intensivo, as profundidades do solo variam da seguinte forma: 200 a 250 mm para grama, 500 a 600 mm para plantas herbáceas e arbustos e 500 a 1300 mm para árvores. Já Grub (1986) indica as seguintes espessuras: 80 mm para grama, 150 mm para vegetação rasteira, 250 mm para arbustos, até 3 metros de altura, 350 mm para arbustos até 6 metros de altura, 650 mm para árvores até 10 metros e 1000 mm para árvores até 15 metros de altura.

Estas especificações podem resultar em perfis demasiadamente profundos, pesados e de alto custo. Segundo Tandy et al. (1976), é possível utilizar profundidades menores, desde que a planta possa adaptar-se a esta redução e que a manutenção seja mais cuidadosa, principalmente em termos de rega. Quando o peso passa a ser um problema, podem ser usadas misturas leves de solo. Elementos como turfa, vermiculita, espuma de plástico e argila expandida podem ser utilizados, porém, quando molhados, a redução do peso não é tão grande quanto se espera. Estas misturas apresentam um risco em relação à menor profundidade de fixação das raízes, principalmente para plantas altas.

Nas coberturas verdes, as raízes das plantas tendem a expandir-se horizontalmente, abrangendo uma ampla zona, para não serem arrancadas pelo vento. Como a fixação ao solo é essencial para todas as plantas, especialmente para arbustos e árvores, o rompimento de contato íntimo entre o solo e as raízes, causado pelo vento, pode ser mortal para as plantas. Assim, para as de maior porte são necessários dispositivos de fixação, como cabos de contenção, fixados na estrutura, para ancoragem de raízes.

2.2.1.3. Camada filtrante

A camada filtrante tem o objetivo de impedir a passagem de pequenas partículas, que possam obstruir a camada drenante ao longo do tempo, causando perda de permeabilidade à água. De acordo com o ponto de vista dos autores considerados (Grub, Johnston e Newton), podem ser usadas camadas de fibra de vidro, com espessura de 15 a 50 mm, ou outros materiais típicos de filtração, como as mantas geotêxteis. De acordo com Morgado (1995) e indicações do fabricante, a manta ideal para esta finalidade é aquela com 200 g/m². A manta deve ser estendida sobre a camada drenante, colocada com especial cuidado na sobreposição, que deve ter largura mínima de 200 mm e colada ao longo de todo o perímetro do rodapé.

2.2.1.4. Camada drenante

Esta camada tem o objetivo de escoar eficazmente a água, evitando que o solo fique encharcado. Certos sistemas extensivos de coberturas verdes não necessitam da camada drenante, quando, por exemplo, a declividade é maior do que 5° e a vegetação não excede 25 cm de altura. Em coberturas verdes planas, a camada drenante é necessária. O sistema de drenagem pode constituir-se de ralos, distribuídos regularmente, abaixo da camada drenante e protegidos com uma fina tela sobre cada um.

Johnston e Newton (1991) citam dois métodos principais para obtenção da camada drenante: camada de material granular e elementos manufaturados de drenagem e de retenção de água.

O sistema de camada de material granular pode empregar materiais como brita, seixo rolado ou argila expandida, dispostos sobre a cobertura impermeabilizada, com inclinação não menor que 2%. A especificação da espessura da camada drenante é variável. Grub (1986) define a espessura em função da altura da camada de solo, assim: 70 mm para grama, 100 mm para vegetação rasteira e arbustos até 3 metros de altura, 150 mm para arbustos até 6 metros de altura, 350mm para árvores até 10 metros e 500 mm para arvores até 15 metros de altura.

O elementos manufaturados de drenagem e retenção de água, à base de poliestireno, permitem o escoamento rápido das águas, retendo parte em pequenos reservatórios, que garantem a manutenção da umidade necessária às plantas por longo tempo, minimizando, desta forma, a irrigação ou, até mesmo, tornando-a desnecessária. Este sistema é bastante usado na Europa, sendo, inclusive, recomendado pela legislação alemã. Appl e Zink (1994)

2 - Revisão Bibliográfica

comentam as vantagens do uso destes elementos na instalação de coberturas verdes e relatam sua aplicação na reforma de um conjunto de moradias já existentes, onde foram especificados de acordo com a legislação. Os autores informam que estes elementos podem ser fabricados com um dos sete tipos de poliestireno existentes e já aprovados em função da baixa absorção de água registrada, após encharcados por longo tempo. Devido à sua composição, estes elementos também funcionam como camada de isolamento térmico. Alguns de seus índices térmicos já são conhecidos. Um elemento com 140 mm de espessura apresenta resistência térmica de $1,6 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$, que corresponde a 65 mm de um bom isolante térmico.

2.2.1.5. Proteção da impermeabilização contra raízes

A ação das raízes pode causar sérios danos à membrana ou manta impermeabilizante. A espessura crescente das raízes, com o passar dos anos, exerce uma força poderosa, a que os materiais asfálticos normalmente não podem resistir. Assim, deve ser disposta uma proteção sobre a impermeabilização, especialmente quando forem plantadas árvores. Grub (1986) enfatiza a necessidade do uso desta proteção, independentemente do que venha a ser plantado, considerando que a força agressiva das raízes não deve nunca ser subestimada. Afirma, ainda, que não basta a superfície do material empregado ser resistente à raiz, pois o perigo está nas emendas ou trespasses, sendo preciso cuidado especial quando houver aberturas na cobertura, como chaminés e antenas. Nestes casos, para maior segurança, a camada protetora deverá subir além da camada de solo, para que as raízes não penetrem por nenhum lado.

A proteção contra raízes pode constituir uma camada especial sobre a impermeabilização. Dependendo das características do material, a camada pode ser única, com duas funções, isto é: anti-raiz e impermeabilizante. Para isto, o material deve possuir um aditivo herbicida que iniba o contato e perfuração das raízes, desviando seu curso. Atualmente, as mantas impermeabilizantes, com aditivo herbicida, já são disponíveis no mercado nacional, com custo máximo de 10% acima do correspondente a manta sem aditivo. É importante que este inibidor não ataque a raiz. No caso de a proteção constituir-se de camada especial, segundo Morgado (1995), as soluções podem ser: a) pintura anti-raiz à base de alcatrão, com polímero sobre a camada de proteção mecânica da impermeabilização; b) uso de uma camada de laminado, geralmente de folhas de cobre; c) manta de polietileno especial sem emendas, ou quando estas existirem, sobreposição com, no mínimo, 1 metro. Appl e Zink (1994) informam que, além destas alternativas, podem ser usados pisos

2 - Revisão Bibliográfica

cerâmicos (tijoletas). Johnston e Newton (1991) citam que, nas coberturas verdes extensivas, são usadas, comumente, camadas de material semelhante a PVC.

2.2.1.6. Impermeabilização

A impermeabilização de uma cobertura é uma etapa da construção cujo projeto deve ser desenvolvido de forma integrada com o projeto da edificação. Este deve prever caimentos e rebaixamentos necessários, além de estudar a interação com as instalações. Segundo Pirondi (1979), Picchi (1986) e Verçoza (1987), o projeto deve constituir-se de diversas camadas, a fim de propiciar bom desempenho. Além da impermeabilização, são necessárias camadas de regularização e proteção, bem como isolamento térmico.

A camada de regularização tem a função de garantir uma superfície regular, lisa, sem protuberâncias ou materiais soltos, que podem danificar a impermeabilização, com caimento mínimo de 1% em direção aos coletores de água e cantos e arestas arredondados. Quando não há trânsito, quanto maior o caimento, melhor. É importante que este caimento seja uniforme, de forma a não criar bolsões de água parada.

A camada de isolamento térmico será tratada no item seguinte, que aborda os terraços, uma vez que, no caso de coberturas com vegetação, pode ser dispensada.

A camada de proteção mecânica tem a função de proteger a membrana impermeabilizante da ação de agentes atmosféricos e, eventualmente, de ações mecânicas, que podem ser causados por trabalhos de construção, plantio e manutenção. Também auxilia na proteção da impermeabilização contra os componentes químicos do solo, que, segundo Tandy et al. (1976), normalmente não são considerados grande perigo. Para sua execução, existem várias alternativas: argamassa, concreto armado (no caso de trânsito de veículos), pisos e agregados soltos.

Os sistemas de impermeabilização podem ser de diferentes tipos: rígidos ou flexíveis, aderentes ou não às lajes, armados ou não, protegidos ou expostos, etc.. Nas coberturas, são utilizados os sistemas flexíveis. Os métodos de execução podem ser pré-fabricados ou moldados no local.

2 - Revisão Bibliográfica

Picchi (1986) relaciona os sistemas de impermeabilização utilizados em coberturas, classificando-os conforme o método de execução e materiais:

- **Sistemas moldados no local** (Membranas): asfálticas (feltro asfáltico e asfalto, emulsão asfáltica e véu de fibra de vidro, membranas asfálticas) e poliméricas sintéticas (neoprene e hypalon, membranas acrílicas, membranas poliméricas sintéticas).
- **Sistemas pré-fabricados** (Mantas): asfálticas (mantas de asfalto, manta de asfalto com herbicida) e poliméricas sintéticas (manta de butil e manta de PVC).

Minke (1986) sugere que a manta impermeabilizante deva ser, também, resistente a ácidos húmicos, bem como à radiação ultravioleta.

As coberturas verdes executadas nas décadas de 30 a 50, segundo Morgado (1995), foram impermeabilizadas com asfalto a quente, com excessivo consumo e protegidas com folhas de cobre. Tandy et al. (1976) chamam a atenção para o fato de que, quando houver elementos que se fixam ao solo, estes não devem traspasar, sempre que possível, a impermeabilização. Nos casos inevitáveis, a solução é elevar a capa impermeabilizante até acima do nível do solo.

2.2.1.7. Estrutura

A opção de implantar vegetação em uma cobertura implica sobrecarga na estrutura que a suporta. Para a avaliação do carregamento total sobre a estrutura, dois tipos de carregamentos devem ser considerados: cargas permanentes e cargas acidentais. Esta última leva em conta o tipo de atividade que será exercida nesta cobertura.

Quanto às cargas acidentais, em uma cobertura com vegetação, tanto Tandy et al. (1976), como Johnston e Newton (1991), consideram a circulação de pessoas e máquinas de manutenção. Krolkiewicz (1992) chama a atenção quanto ao efeito de sucção causado pelo vento na vegetação, quanto à estabilidade de grandes árvores e quanto à sobrecarga gerada pelo depósito de materiais durante a construção. Tandy et al. (1976) sugerem o uso de cabos de contenção subterrâneos para ajudar a estabilidade das árvores.

Quanto às cargas permanentes, os autores citados anteriormente consideram as seguintes: peso de todas as camadas, como regularização, impermeabilização, proteção, drenante, substrato em estado saturado e outras que venham a constituir a cobertura além do

2 - Revisão Bibliográfica

peso da água retida e da vegetação. Árvores, arbustos, piscinas, lagos, pérgolas e outros são consideradas cargas pontuais e, sempre que possível, devem aproximar-se dos elementos estruturais, colocando, por exemplo, as árvores diretamente sobre pilares.

Em casos de adaptação de cobertura verde a uma edificação já existente, deverá se verificar a capacidade portante da estrutura para o novo carregamento. O sistema extensivo de coberturas verdes é indicado, a fim de minimizar a nova hipótese de carregamento da estrutura.

Johnston e Newton (1991) informam que, dependendo do tipo de solo, se saturado, o peso, para cada centímetro de profundidade, pode variar de 5 kg/m² para a turfa até 22 kg/m² para o saibro.

2.2.2. *Comportamento Térmico*

O estudo do comportamento térmico de coberturas com vegetação vem sendo desenvolvido há vários anos. Hoyano (1984) desenvolveu um experimento usando uma camada de turfa sobre o telhado para estudar a redução de cargas de resfriamento e aquecimento e a melhora do ambiente interno da edificação. A fim de estabelecer comparação, foram monitorados três modelos em tamanho natural: dois com camadas de vegetação de diferentes densidades e o outro com solo nu. Dados, tais como temperaturas superficial e do solo, refletância das superfícies, volumes de água da chuva e drenada, umidade do solo e dados climáticos foram levantados durante o período de um ano. Para a medição das temperaturas superficiais, foram usados termopares e, para a refletância, foi empregado um espectrômetro portátil.

Discutindo os resultados, o autor constatou que a radiação solar refletida pela vegetação rasteira (turfa) apresenta valores mais ou menos constantes em torno de 22 a 26% ao longo do ano, enquanto o solo nu apresenta valores de 37 a 22%, variando, conforme a superfície esteja seca ou úmida, respectivamente.

Hoyano avaliou a variação da temperatura superficial considerando somente os dias claros ao longo do ano. A temperatura superficial máxima na vegetação chegou a 40 °C em maio e junho, quando a radiação solar atinge o máximo, no hemisfério norte. No verão, a temperatura superficial da vegetação é 5 a 15 °C mais baixa que as temperaturas do solo e do

2 - Revisão Bibliográfica

piso cimentado, que chegam a 45 e 55 °C, respectivamente. As temperaturas superficiais mínimas da vegetação e do solo são 3 a 7 °C mais baixas que a temperatura média do ar durante todo o ano. A partir dos dados obtidos, o autor estabeleceu uma análise de regressão múltipla da diferença entre a temperatura superficial e a temperatura do ar para cada condição física das superfícies com vegetação e solo nu, tendo elementos meteorológicos como variáveis.

Além destes itens, Hoyano analisou as características da energia radiante da superfície vegetada, a distribuição de temperatura dentro da camada de solo, o efeito da radiação solar e, a partir desta, determinada a difusividade térmica equivalente.

Minke (1986) relata que uma cobertura verde, revestida com capim selvagem com 15 cm de substrato leve e 20 a 30 cm de solo, apresenta uma transmitância de até 0,6 W/m²K.

Harazono et al. (1991) estudaram o efeito da cobertura verde com substrato artificial no clima urbano e na carga térmica de edificações. Para tanto, desenvolveram um sistema de cobertura com vegetação, que consistiu na disposição de caixas com substrato artificial leve, com plantas e arbustos transplantados e equipamentos de irrigação. O sistema foi instalado na cobertura do prédio da Universidade de Tsukuba e monitorado durante o período de um ano. As caixas foram dispostas de forma a cobrir a laje de todo um compartimento. Um outro compartimento, não contíguo ao da cobertura verde, foi usado como referência. Os equipamentos de medição empregados foram: termopares de cobre-constantan, para medir temperaturas superficiais e do ar, e psicrômetros para a determinação da umidade relativa.

Os dados registraram, em dias claros de verão, temperaturas superficiais, de até 50 °C, no terraço em referência, enquanto no terraço com vegetação, a temperatura não chegou a 35 °C. A temperatura do ar, no compartimento sob a vegetação, apresentou-se 2 a 3 °C menor que na sala de referência. Já em dias claros de inverno, a temperatura superficial no terraço de referência ficou em torno de 30 °C, enquanto no terraço com vegetação, ficou ao redor de 11 °C. A diferença da temperatura interna das salas em estudo, no inverno, variou entre 0.5 e 1 °C, sendo menor no compartimento com vegetação.

Para a determinação do fluxo de calor incidente sobre os dois terraços, com e sem vegetação, os autores adotaram o método do Fator de Resposta, proposto por Mitalas e Stephenson.

Concluindo, Harozano et al. (1991), ressaltam que o método é adequado pois:

- embeleza terraços e espaços abertos em áreas urbanizadas;
- a umidade relativa do ar no entorno da vegetação é significativamente incrementada, devido à evapotranspiração, principalmente no período de verão;
- o fluxo de calor transferido para o interior da sala de referência é de 200 W/m^2 , enquanto na sala com vegetação, é de aproximadamente, 10 W/m^2 , em dias claros de verão.

Assim, os autores concluem que o sistema com vegetação pode ser usado, com sucesso, para reduzir a carga térmica de edificações e moderar climas quentes e secos, em áreas urbanizadas durante o verão.

Tiwari et al. (1994), em estudo comparativo entre várias técnicas de resfriamento passivo, avaliaram o desempenho da cobertura verde. Para análise térmica, a cobertura verde foi considerada essencialmente um sistema de resfriamento evaporativo, exceto no aspecto que exige uma camada de solo sobre a laje, para o cultivo de grama ou outra vegetação. Desta forma, as soluções de cobertura com vegetação, com lâmina d'água e com água em movimento, ficaram enquadradas como sistema de resfriamento evaporativo. Para fins de simulação, o equacionamento genérico adotado foi o mesmo. A análise simulada computacionalmente adotou dados climáticos de Delhi (Índia) e concluiu que o resfriamento evaporativo é a melhor técnica para reduzir o fluxo de calor que chega através da cobertura, se a água for facilmente disponível.

2.2.3. Irrigação

A irrigação artificial é de suma importância para sistemas intensivos de coberturas verdes, principalmente quando escolhidas plantas pouco tolerantes à seca. Uma forma de reduzir a dependência da irrigação é a escolha daquelas que toleram condições áridas e podem ser especificadas em projetos do sistema intensivo ou extensivo.

Quanto menor for a profundidade do solo, mais freqüente deverá ser a irrigação. Camadas de solo com pequena profundidade chegam a exigir rega várias vezes ao dia, em situação de calor e seca.

2 - Revisão Bibliográfica

O sistema de irrigação deve ser projetado de forma integrada com os demais projetos da edificação. Segundo Tandy et al. (1976), o sistema de irrigação mais adequado é aquele constituído por aspersores que podem regar em círculos. O autor chama a atenção para que o projetista tenha cuidado na disposição de tais equipamentos, de modo que estes não alcancem transeuntes ou cheguem a propriedades vizinhas. Outra alternativa, para o sistema de irrigação, é a utilização de tubulações subterrâneas. A água da chuva pode ser canalizada dos telhados adjacentes e armazenada para ser utilizada, posteriormente, na irrigação. A tecnologia atual possibilita que os sistemas de irrigação sejam controlados eletronicamente. O controle da irrigação pode ser por dia ou períodos de rega, sendo também possível a utilização de sensores, que ativam o funcionamento do sistema, quando os níveis de umidade do solo são insuficientes.

2.2.4. Manutenção

Varia muito a necessidade de manutenção nas coberturas verdes. Algumas precisam de irrigação eventual, principalmente em períodos de secas severas, sendo necessário, de tempos em tempos, a remoção de sementes de árvores e invasoras. Kölb, citado por Johnston e Newton (1991), afirma que, para limpar e remover sementes de árvores de um sistema extensivo de cobertura verde, são gastos, por ano, oito minutos, por metro quadrado. A frequência de manutenção, bem como a irrigação, dependem das espécies vegetais escolhidas e dos objetivos do projeto.

Os custos de manutenção variam de acordo com os objetivos da cobertura verde. Jardins formais, com plantas exigentes, requerem abastecimento de água, limpeza das ervas daninhas, fertilização e corte ou poda. Para jardins menos formais, portanto mais naturais, haverá menos manutenção, daí resultando custo menor.

2.2.5. Custos

Os custos passam a ser consideráveis quando houver necessidade de solo com profundidade maior que 200 mm, várias camadas de proteção e drenagem, acrescidos dos decorrentes sistema de irrigação e sobrecarga na estrutura. Os custos de implantação de um sistema extensivo são muito menores que aqueles de um sistema intensivo, para uma mesma área. Segundo Brownlie, citado por Johnston e Newton (1991), algumas estimativas sugerem

2 - Revisão Bibliográfica

que os custos adicionais da implantação de um sistema intensivo de cobertura verde podem ser reduzidos de 50% a até 80%, principalmente se não houver necessidade de reforço na estrutura, quando comparado com a implantação de um sistema extensivo. Para pequenas profundidades de solo, usualmente menos de 150 mm, o carregamento médio é equivalente àquele em coberturas planas pavimentadas.

É muito difícil estabelecer comparações entre os custos de prédios com ou sem cobertura verde, porque várias são as alternativas. Os custos variam de um para outro tipo de estrutura e dependem muito do piso e das espécies de vegetação especificados devido às espessuras de solo exigidas por cada tipo de planta.

Tandy et al. (1976) apresentaram um estudo comparativo de custos unitários adicionais, considerando coberturas planas de concreto armado, impermeabilizada e pavimentada com lajotas de concreto e o mesmo terraço com cobertura vegetal. O estudo aborda prédios de apartamentos de quatro e dez pavimentos. A comparação é feita para três situações: jardim gramado, jardim com arbustos e jardim com árvores e espessuras de solo com 300 mm, 600 mm e 1200 mm, respectivamente. As três alternativas incluem camadas de filtragem e drenante, com espessuras adequadas. Os itens abordados na comparação foram: custos unitários adicionais em relação à estrutura, ao acabamento (piso ou vegetação) e à soma dos dois. Os resultados obtidos são mostrados na tabela 1.

Tabela 1 – Custos unitários adicionais em relação à estrutura e à estrutura mais acabamento, em prédios de 4 e 10 pavimentos, considerando coberturas planas pavimentadas e, com cobertura vegetal.

Tipo de prédio		Custos unitários adicionais (%)	
		Estrutura	Estrutura + acabamento
Quatro Pavimentos	Gramado	46	26
	Arbustos	110	150
	Árvores	203	203
Dez Pavimentos	Gramado	86	54
	Arbustos	200	205
	Árvores	333	285

Fonte: Tandy et Al. (1976)

Köhler, citado por Johnston e Newton (1991), chama a atenção para o fato de que os percentuais adicionais de custo de uma cobertura verde são pouco significativos quando

2 - Revisão Bibliográfica

relacionados ao total do custo da obra. O autor refere-se a um exemplo, em que este percentual chega a um modesto 0,1% do custo total do empreendimento.

2.3. COBERTURAS COM TERRAÇO

As coberturas com terraço podem ser destinadas a vários tipos de atividade, como jogos, contemplação, alimentação e outras formas recreativas que normalmente ocorrem no solo. Os terraços, assim como as coberturas com vegetação, segundo Tandy et al. (1976), exigem do projetista atenção para alguns itens, como:

- **Intimidade adequada e proteção contra o vento** - quanto mais elevada for a cobertura, maior será a necessidade de resguardo. A proteção contra o vento torna as características físicas do lugar mais agradáveis ao usuário.
- **Segurança** - quanto à segurança em relação a quedas, o projeto deve atender às normas legais sobre parapeitos e balcões. Quando as atividades forem diversas, como jogos e outros, a altura da proteção deverá ser maior. Um projeto mais completo pode, além de impedir a queda, evitar o efeito de vertigem, prevendo, por exemplo, prolongamento do piso além da proteção vertical ou, uma proteção inclinada, ou, ainda, uma proteção bem larga, em forma de floreira.
- **Iluminação** - com o objetivo de aumentar o período de utilização de um terraço ou uma cobertura com jardim, deve ser previsto o sistema de iluminação. Os critérios de projeto de iluminação são os mesmos aplicados ao nível do solo.
- **Acesso** - o acesso às coberturas, ainda em fase de projeto, deve considerar o tipo de atividade prevista, além da necessidade de manutenção, serviços de bombeiros e construção.

2.3.1. Aspectos Construtivos

As diversas camadas que constituem um terraço, citadas por autores como Pirondi (1979), Picchi (1986) e Verçoza (1987), são: acabamento final, isolamento térmica, impermeabilização e estrutura portante. A figura 3 mostra o perfil genérico de uma cobertura com terraço.

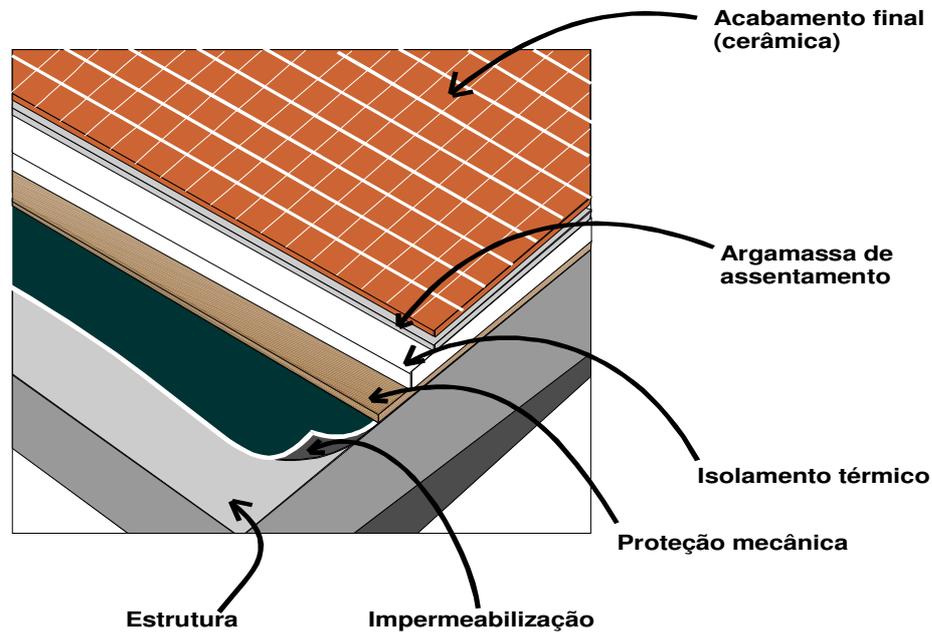


Figura 3 - Perfil genérico de uma cobertura com terraço.

2.3.1.1. Acabamento final

O acabamento final de um terraço, dependendo da especificação de projeto, pode ser em pisos nobres (pedras naturais ou cerâmicas), concreto armado ou ainda agregados soltos (brita, seixo rolado ou argila expandida). Os pisos exigem uma camada de argamassa de assentamento.

2.3.1.2. Isolamento térmico

A camada de isolamento térmico, que pode ser dispensada nas coberturas verdes, com clima não rigoroso demais, é de grande importância nos terraços, minimizando o efeito das variações térmicas e melhorando as condições de conforto térmico dos compartimentos abaixo destes. Além do aspecto de comportamento térmico, o isolamento térmico tem um importante papel sobre a impermeabilização e a estrutura. Os esforços gerados pela movimentação da superfície impermeabilizada, devido à dilatação térmica, constituem uma das principais razões que levam ao rompimento da impermeabilização em serviço. A ordem de grandeza destes esforços, em terraços, onde, segundo Verçoza (1987), a variação térmica pode chegar a mais de 60 °C, é suficiente para romper impermeabilizações usuais.

2 - Revisão Bibliográfica

O isolamento térmico é dimensionado em função das características particulares de cada obra. Este pode ser constituído de vários materiais, sendo mais adequados para coberturas de concreto, segundo Picchi (1986), as argamassas e concretos leves (celular ou com agregados leves) e os plásticos alveolares (poliestireno expandido ou extrudado, espuma rígida de poliuretano).

O isolamento térmico, em relação à impermeabilização, pode estar localizado sob ou sobre essa camada, devendo cada caso ser analisado particularmente.

Segundo Pirondi (1979) e Picchi (1986), o sistema em que se usa o isolamento térmico sob a impermeabilização é chamado de B.U.R. - “Bitumen Uninsulated Roof”. Apresenta a vantagem de o material isolante ficar protegido da umidade; entretanto a impermeabilização não fica termicamente protegida. Neste sistema, é imprescindível o uso da barreira de vapor.

Quando o isolamento térmico fica sobre a impermeabilização, o sistema é chamado U.S.D. - “Up Side Down”. Segundo Picchi (1986), é o mais comum no Brasil e apresenta a vantagem de proteger termicamente a impermeabilização. Este sistema, entretanto, só passou a ser possível de ser usado com o surgimento de materiais isolantes térmicos, que absorvem menos água.

2.3.1.3. Impermeabilização

O projeto de impermeabilização de um terraço tem, basicamente, as mesmas exigências de uma cobertura com vegetação; assim tudo o que foi dito no item 2.3.1.6 é válido também para os terraços. Quando se fala em impermeabilização, entende-se que, além da impermeabilização propriamente dita, devem existir camadas de proteção e de regularização, já discutidas no item anterior. Estas camadas aparecem no croqui, na figura 3.

2.3.1.4. Estrutura

Assim como nas coberturas com vegetação, a estrutura da cobertura de um terraço é a parte da cobertura destinada a resistir às solicitações dos carregamentos permanentes e acidentais. A estrutura, no caso de coberturas planas, pode ser uma laje horizontal, maciça ou nervurada. A estrutura, do ponto de vista construtivo, pode ser moldada “in loco” ou pré-moldada. Os carregamentos acidentais são determinados pela norma brasileira NBR 6120

2 - Revisão Bibliográfica

(1980), que os estabelece em função do tipo de atividade que será exercida naquele pavimento. Os carregamentos permanentes devem levar em conta todas as camadas constituintes deste terraço, desde a pavimentação final até o peso próprio da estrutura.

2.3.2. Manutenção

As exigências de manutenção de um terraço são menores que as de uma cobertura verde, incluindo limpeza e pinturas periódicas.

2.3.3. Patologias

Dal Molin (1988) relata, em estudo do levantamento e análise de manifestações patológicas atendidas pela Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC, no período de 1977 a 1986, que, em vários laudos de patologias, estudados pela CIENTEC, em levantamento de casos no Rio Grande do Sul, foi encontrado elevado percentual de fissuras causadas por movimentação térmica externa, indicando quanto é importante o cálculo do efeito das variações de temperatura para reduzir as tensões que se produzem na estrutura, mesmo para extensões menores que 30 m, estipulado por norma. Entre os tipos de fissuras em concreto armado, aquelas por movimentação térmica causada por variação das condições ambientais atingem o maior percentual, chegando a aproximadamente 30%. Este percentual leva a pensar se o limite estipulado pela norma NBR 6118 (1980) para dispensa do cálculo da influência da variação térmica (30 m, dimensão não interrompida) não se apresenta insatisfatório para o RS, pois, são registradas variações de temperaturas diárias e anuais muito grandes, da ordem de 21 e 37 °C, respectivamente. Embora a maioria das fissuras causadas por movimentação térmica sejam fissuras sem gravidade ou com gravidade moderadas, podem causar problemas na funcionalidade, como romper a impermeabilização e/ou acabar com a estanqueidade.

As patologias por problemas térmicos registram os seguintes percentuais: ≈55% em casas térreas, 42% casas com mais de um pavimento, 32% em edifícios com mais de 3 pavimentos, 22% edifícios com até 3 pavimentos e 18% nas demais edificações.

Do total de fissuras por dilatação térmica externa, mais de 50% ocorrem nas lajes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento visa à análise do desempenho térmico de coberturas planas. Para tanto, foi necessário construir e instrumentar uma bancada experimental, que ficou exposta às condições climáticas naturais.

O presente capítulo tem o objetivo de descrever o local de implantação do experimento, a bancada experimental e a instrumentação usada, bem como os métodos empregados e a avaliação da incerteza das medidas obtidas.

O projeto da bancada experimental é apresentado como um todo, mas as coberturas em estudo são detalhadas em suas várias camadas constituintes. Os materiais empregados na construção da bancada são caracterizados quanto às suas propriedades físicas e térmicas. O local de instalação dos sensores é identificado em cada cobertura, sendo também descrita a forma como foram instalados.

3.1. DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO

O experimento monitorou duas coberturas planas de uma bancada experimental. As coberturas estudadas são: uma plana, com vegetação em sistema extensivo e uma plana, tipo terraço, pavimentada com piso cerâmico e isolada termicamente.

3.1.1. *Localização do Experimento*

O experimento foi implantado em área experimental da EMBRAPA, ao lado da Estação Agroclimatológica do convênio UFPel / EMBRAPA, junto ao Campus Universitário

3 - *Materiais e Métodos*

da Universidade Federal de Pelotas - UFPel, no município vizinho de Capão do Leão, antigo distrito de Pelotas, RS.

A cidade de Pelotas está situada no Estado do Rio Grande do Sul, tendo como coordenadas geográficas 31^o46'S de latitude, 52^o21' O de longitude e 13,0 m de altitude. Situada às margens da Lagoa dos Patos, tem seu clima influenciado pela presença deste grande volume de águas. De acordo com a classificação de Nimer (1989), o clima da região é do tipo temperado.

Segundo as normais climatológicas, referentes a um período de 30 anos (1961 a 1990) fornecido pela Estação Agroclimatológica UFPel/EMBRAPA, os meses de dezembro a março são os mais quentes, sendo janeiro e fevereiro os de temperaturas mais elevadas. As normais registram para janeiro as seguintes temperaturas: média de 23,2 °C, média das máximas igual a 28,2 °C e máxima absoluta de 39,0 °C. Em março, os valores são, respectivamente: 21,6 °C, 26,7 °C e 37,4 °C. No inverno, os meses mais frios são junho, julho e agosto. Junho registra temperatura média de 12,6 °C, média das mínimas de 8,4 °C e mínima absoluta de 3,8 °C negativos. Os meses que apresentam umidade mais baixa são dezembro e janeiro (74,8 e 76,1%), enquanto os meses de maio a setembro são os mais úmidos (82,8 a 85,4%).

A figura 4 apresenta o croqui do local de implantação da bancada experimental, enquanto a figura 5 mostra uma vista do experimento durante o período de medições.

3.1.2. Descrição da Bancada Experimental

O projeto da bancada experimental é uma adaptação daquele desenvolvido e empregado por Lamberts (1983), para estudar o desempenho térmico de coberturas leves com ático.

A figura 6 mostra o projeto da bancada, uma pequena construção de 4,0 m x 2,6 m em planta e 1,4 m de pé direito. Devido às características do solo, executou-se uma fundação, sob as paredes, constituída por duas fiadas de pedra. O piso é formado por uma laje de concreto e as paredes, por pedra granítica, não revestidas internamente. A construção é envolvida por taludes de terra e tem três coberturas independentes, duas das quais são o objeto do estudo. A parte superior das paredes externas, não coberta pelo talude, foi revestida com reboco e pintada de branco.

3 - Materiais e Métodos

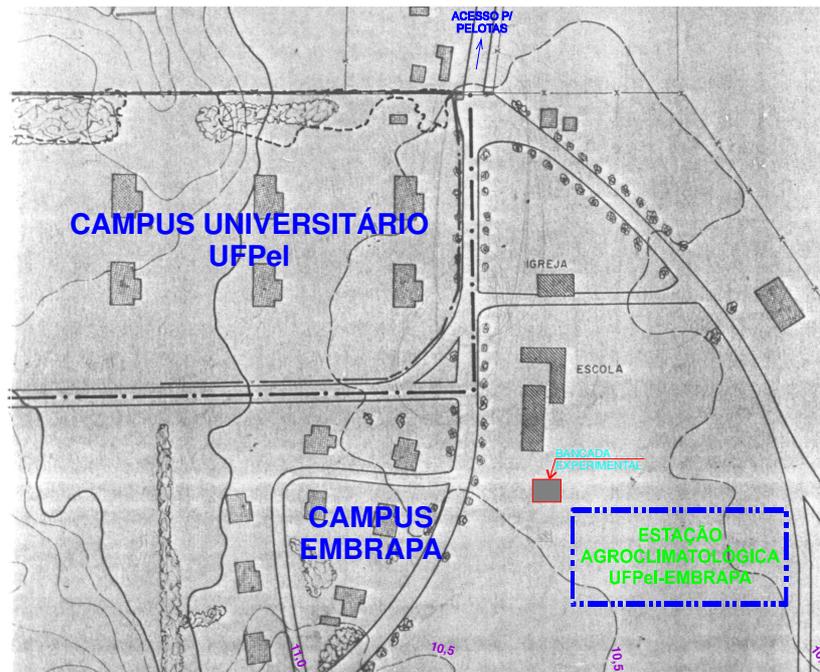


Figura 4 - Croqui do local de implantação do experimento



Figura 5 - Vista da bancada experimental durante o período de medições

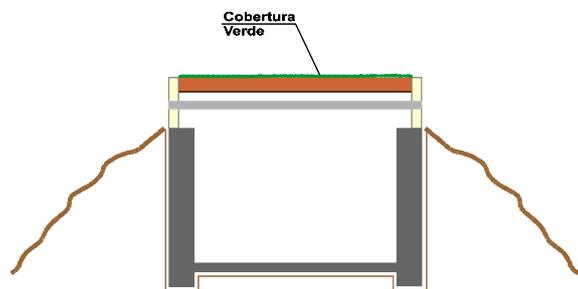
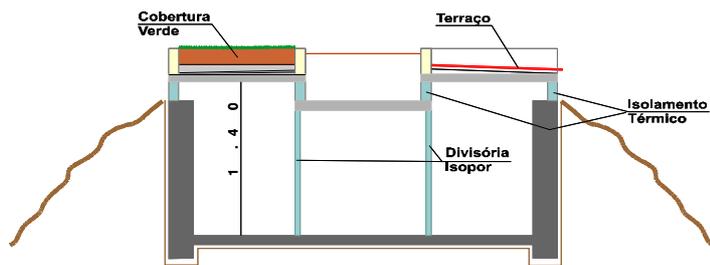
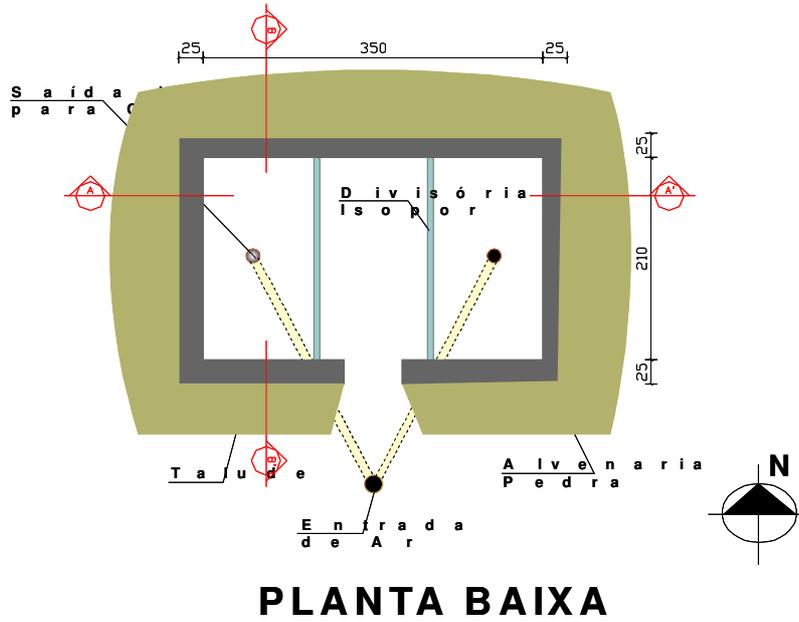


Figura 6 - Projeto da bancada experimental.

3 - *Materiais e Métodos*

O talude foi executado a fim de aumentar a inércia térmica das paredes, fazendo com que, nas horas de pique da temperatura do ar externo e da radiação solar, o fluxo térmico pelas coberturas fosse o mais significativo.

Internamente, a bancada foi dividida em 3 câmaras, de tal forma que a cada cobertura correspondesse uma câmara. A divisão, feita com folhas justapostas de isopor, tem espessura total de 25 mm. As câmaras laterais são objeto de estudo e a central serviu como local de instalação do equipamento de aquisição e registro de dados.

Na fachada sul, uma pequena porta permite acesso à colocação da instrumentação. A bancada é dotada de um sistema de ventilação, a fim de evitar a estratificação e retirar o excesso de umidade do ar. A entrada de ar dá-se através de tubulações subterrâneas, que trazem o ar de um local ao sul da bancada, sendo feita a exaustão por uma chaminé, situada na laje central.

A cobertura é constituída por três lajes de concreto armado. A da parte central da bancada foi executada em concreto pouco adensado, com 10 cm de espessura, num nível 15 cm abaixo das lajes laterais. Foi mantida sombreada com telhas de barro e separada das demais por material isolante térmico, servindo de elemento separador das coberturas em estudo e evitando a criação de pontes térmicas. As lajes laterais foram executadas com 10 cm de espessura, ambas no mesmo nível. Conforme o acabamento final que tenham recebido, vegetação ou terraço, estas lajes passarão a ser referidas como CV e CT, respectivamente.

As lajes foram apoiadas somente nas laterais menores, de forma a minimizar o efeito de pontes térmicas e buscando, assim, um fluxo de calor unidimensional. Para o fechamento lateral abaixo das lajes, ao longo das maiores dimensões, foi empregada uma camada de isolante térmico, em poliestireno expandido (isopor), com 80 mm de espessura, revestido de papel alumínio. Externamente, esta camada recebeu chapisco e reboco, sendo posteriormente pintada de branco.

3.1.2.1. Fases de execução

A construção da bancada começou em junho de 1995.

- **1ª fase -**

Execução dos seguintes itens: fundações, piso, paredes, lajes de cobertura e talude. Devido ao período chuvoso, esta etapa estendeu-se até final de julho (Figura 7- a).

- **2ª fase -**

Colocação das camadas de isolamento térmico, sob os vãos das lajes, para, posteriormente, serem executados o revestimento e a pintura externos (Figura 7 - b).

- **3ª fase -**

Execução dos acabamentos nas lajes de cobertura (Figura 8): camada de regularização, impermeabilização, proteção mecânica, colocação do isolamento térmico e piso no terraço, telhamento na laje central, colocação da camada drenante, solo, plantio da grama na cobertura verde e instalação elétrica. (Iniciada em novembro e terminada na primeira quinzena de dezembro).

Os recursos para a terceira etapa da obra foram liberados pela Coordenação do Curso de Pós-graduação em Engenharia Civil - UFRGS. Para tanto, foi necessário realizar tomada de preços de todos os serviços, o que retardou a execução. As duas primeiras fases foram executadas com recursos próprios.

3.1.2.2. Detalhamento das coberturas estudadas

As lajes das coberturas estudadas, CV e CT, receberam os mesmos serviços de impermeabilização, ou seja: primeiramente, uma camada de regularização, com a finalidade de dar caimento, em argamassa de cimento e areia, traço 1:3; em seguida, manta asfáltica (4 mm), seguida de uma camada de proteção em argamassa de cimento e areia, traço 1:7, com 2 cm de espessura. A partir de então, as coberturas se diferenciaram.

A cobertura verde, CV, foi projetada e executada de forma a caracterizar um sistema extensivo, de acordo com os autores Johnston e Newton (1991), Krolkiewicz (1992) e Morgado (1995), isto é: camada de solo com espessura menor que 200 mm, gramínea e inexistência de sistema de irrigação.



a) Fase inicial de construção



b) Fase intermediária de construção

Figura 7 – Fases inicial e intermediária de construção da bancada experimental

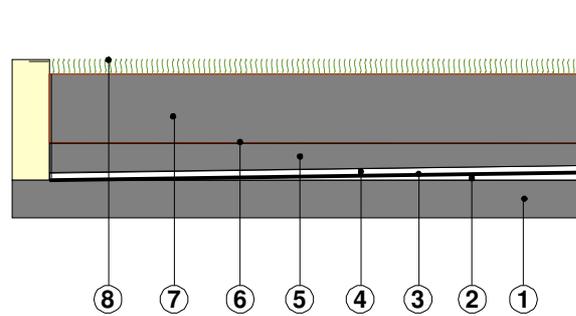


Figura 8 - Fase final de construção da bancada experimental

A camada de substrato foi prevista com 15 cm de espessura, conforme o indicado por Johnston e Newton (1991) para gramíneas (50 a 200 mm). Na execução foram colocados, sobre a camada filtrante, 11 cm de solo vegetal, sobre o qual foi assentada grama em leiva, totalizando 15 (11+4) cm de espessura de solo gramado.

Como camada filtrante foi usada uma manta geotêxtil, com densidade de 200 g/m^2 , de acordo com a indicação de Morgado (1995) e do fabricante.

A camada drenante foi executada em brita, com 7 cm de espessura, conforme orientação de Grub (1986), que recomenda esta espessura, no caso de a vegetação ser grama. A brita foi colocada imediatamente acima da camada de proteção mecânica da impermeabilização. A figura 9 mostra o detalhe das camadas constituintes da cobertura com vegetação.



COBERTURA VERDE - CV

LEGENDA:

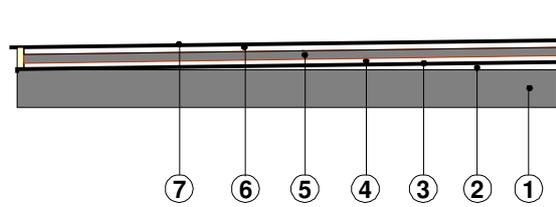
1. Laje concreto armado - (e = 100mm)
2. Camada de regularização- (i = 2%)
3. Impermeabilização - (e = 4mm)
4. Proteção mecânica - (e = 20mm)
5. Camada drenante - (brita - e = 70mm)
6. Manta geotêxtil (e = 2mm)
7. Terra vegetal (e = 150mm)
8. Capa vegetal (grama)

Figura 9 - Detalhe das camadas constituintes da cobertura com vegetação

Nesta laje foi previsto um sistema de drenagem para as águas da chuva e de irrigação. O dreno foi projetado no centro da parede leste; assim, os caimentos executados na camada de regularização, convergiram para este ponto. Durante a colocação da manta asfáltica, foi tomado especial cuidado com esta saída de água.

Na cobertura com terraço, CT, sobre a camada de proteção mecânica, foi colocado o isolamento térmico, constituído por placas moldadas de poliestireno expandido de alta densidade (Isofoam), com 25 mm de espessura. Posteriormente, foi assentado o piso, que constitui-se de lajotas cerâmicas de 20 x 20 cm, com caimento de 2%, para escoamento das águas pluviais. As figuras 10 e 11 mostram, respectivamente, as camadas constituintes do terraço e as lajes com a impermeabilização recém executada.

O emprego de um bom isolante térmico nesta laje teve como objetivo garantir que o elemento de comparação fosse de boa qualidade. Quanto à posição do isolamento térmico, em relação à impermeabilização no terraço, a opção foi usar o sistema “U.S.D.”. Assim, a impermeabilização fica termicamente protegida, como na cobertura com vegetação, tornando possível a comparação dos gradientes de temperaturas, a que ambas impermeabilizações são submetidas. A aplicação deste sistema foi possível em virtude do baixo coeficiente de absorção de água do material empregado no isolamento térmico.



TERRAÇO CT

LEGENDA:

1. Laje concreto armado - (e = 100mm)
2. Camada de regularização- (i = 2%)
3. Impermeabilização - (e = 4mm)
4. Proteção mecânica - (e = 20mm)
5. Isolamento térmico (e = 25mm)
6. Argamassa assentamento (e = 20mm)
7. Piso cerâmico

Figura 10 - Detalhe das camadas constituintes da cobertura com terraço



Figura 11 - Detalhe das lajes com a impermeabilização já executada.

3 - Materiais e Métodos

3.1.2.3. Características dos materiais empregados

Os materiais empregados na construção da bancada experimental foram caracterizados quanto às suas propriedades físicas e térmicas a partir da bibliografia utilizada, por não haver condições de realizá-los em laboratório e por não constituir o objetivo deste trabalho. A tabela 1, abaixo, mostra os coeficientes das propriedades que caracterizam os materiais empregados.

Tabela 2 - Valores das propriedades físicas e térmicas dos materiais

Material	Propriedades				Fonte
	λ (W/m K)	ρ (kg/m ³)	c_p (J/kg K)	α	
Concreto armado	1,4	2400	880	-	Incropera
Argamassacim/areia	0,72	1860	780	-	Incropera
Manta asfáltica	0,31	1125	-	-	Pirondi
Isofoam	0,029	36	-	-	Fabricante
Piso cerâmico	0,46	-	837	0,65/0,80	Frota
Brita	1,81(1)	-	837(2)	-	ASHRAE(1) Frota(2)
Geotêxtil	-	100	-	-	Fabricante
Terra Vegetal	0,60	1800	1465	-	Frota
Gramma	-	-	-	0,75/0,80	Ometto

Legenda: λ - condutividade térmica; ρ - massa específica; c_p - calor específico; α - absortividade

3.2. VARIÁVEIS MEDIDAS

As variáveis, medidas na bancada experimental, foram as seguintes: temperaturas superficiais internas e externas de cada cobertura, temperaturas sobre a camada de proteção mecânica de ambas as impermeabilizações, temperatura na interface solo-manta geotêxtil, temperaturas do ar interno e temperatura de globo em cada cobertura, temperatura do ar externo e radiação solar global e difusa. Além destas variáveis, foi instalado um tensiômetro que possibilitou registrar a variável “potencial mátrico do solo”, a partir da qual é possível estimar a umidade do solo.

Dados relativos a outras variáveis, tais como, velocidade e direção do vento, radiação solar global diária no plano horizontal, precipitação, temperaturas máximas e mínimas e gráficos de umidade relativa e temperatura foram obtidos junto à Estação Agroclimatológica.

3 - Materiais e Métodos

Para aquisição e registro dos valores das variáveis de temperatura e radiação solar, medidas na bancada experimental, foi instalado um equipamento denominado “Data Logger”, de fabricação nacional, modelo DL 4000, marca ECI, de propriedade da CIENTEC.

Este equipamento é um sistema automático de aquisição de dados, destinado a medidas analógicas, com 48 canais de entrada. Realiza leitura praticamente simultânea de todos os canais com varreduras nas entradas, em intervalos preestabelecidos pelo operador, para armazenamento e posterior registro. O aparelho é dotado de uma impressora que registra os dados, apresentando possibilidade de programação, através do teclado dianteiro e ainda, remotamente, através de linha serial. A capacidade de armazenagem do equipamento depende do que está sendo medido: quantas medidas são realizadas por vez e com que frequência são adquiridas.

O *data logger* foi conectado a um sistema de *No-break*, modelo Slim Condicionado, marca SMS Tecnologia Eletrônica Ltda., dotado de bateria externa de 12V, com tempo de autonomia de 2 horas e 40 minutos. A figura 12 mostra o conjunto de equipamentos *data logger* e *No-break* instalados no experimento.

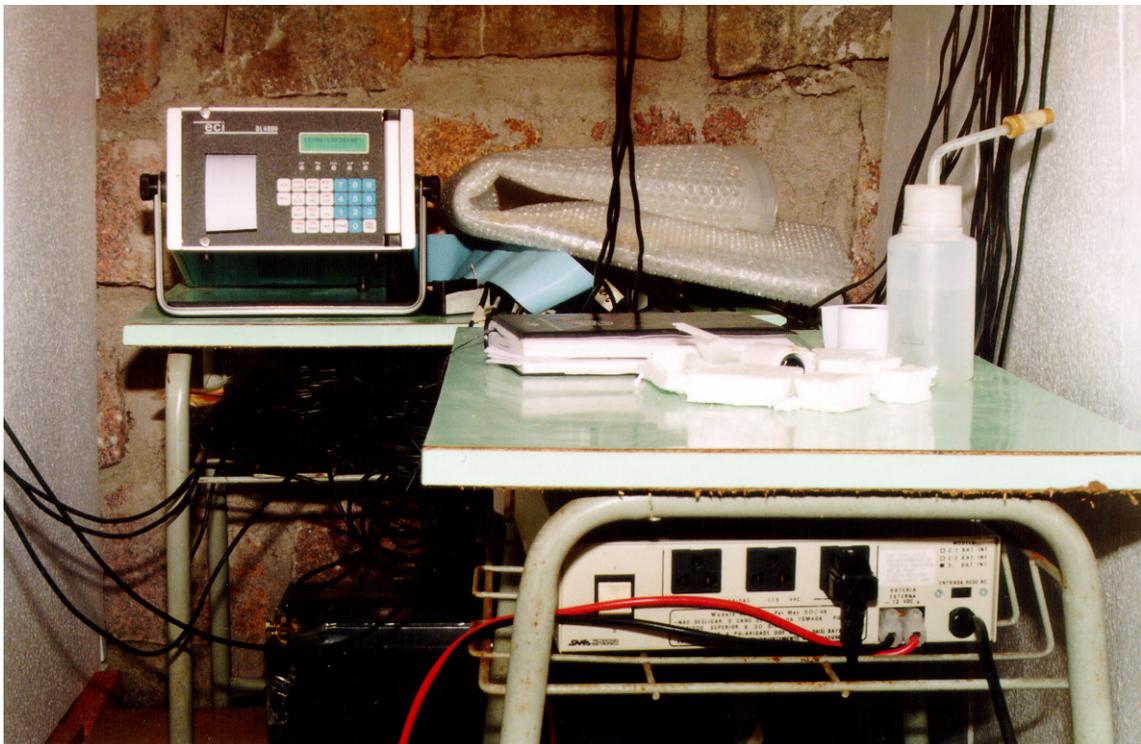


Figura 12 - Conjunto de equipamentos instalados para aquisição e registro de dados

3.2.1. Medidas de Temperatura

As temperaturas foram medidas com sensores tipo termômetros de resistência, de platina (Pt 100), de propriedade da CIENTEC e fabricação nacional (ECI), construídos conforme solicitação do proprietário. Becker (1992) empregou estes sensores na monitoração de uma residência unifamiliar térrea, a fim de avaliar seu desempenho térmico.

O princípio de funcionamento dos termômetros de resistência é baseado no fenômeno da variação linear da resistência, em função da temperatura de um condutor. Os elementos consistem em um enrolamento de fio muito fino de condutor, bobinado entre suportes de material isolante e protegido com um revestimento, usualmente de vidro ou cerâmica, a fim de evitar correntes parasitas e/ou curto-circuito entre os enrolamentos.

Segundo Creus Solé (1983), os materiais usados em termômetros de resistência devem possuir as seguintes características:

- a) alto “coeficiente de temperatura de resistência”, que expressa, a uma temperatura específica, a variação da resistência (em ohms) do condutor, para cada grau de variação de temperatura. Assim, tornar-se-á instrumento muito sensível;
- b) alta resistividade, pois quanto maior a resistência a uma dada temperatura, maior a variação por grau: então, o instrumento terá maior sensibilidade;
- c) relação linear resistência-temperatura;
- d) rigidez e ductilidade, a fim de viabilizar o processo de fabricação, obter pequenos tamanhos e, com isto, ganhar maior velocidade de resposta;
- e) estabilidade das características do material, durante sua vida útil.

Normalmente, os materiais usados em termômetros de resistência são a platina e o níquel, também podendo ser usado o cobre, que apresenta a desvantagem de sua baixa resistividade.

Mede-se a variação da resistência nestes sensores com uma ponte de Wheatstone, em montagens denominadas de 2 (dois) fios, de 3 (três) fios ou de 4 (quatro) fios, segundo sejam o número de fios de conexão do condutor com a ponte. A montagem que possibilita obter

3 - Materiais e Métodos

maior precisão é a 4 (quatro) fios, quando, então, haverá uma compensação das diferentes resistências dos fios de conexão.

Os sensores utilizados no experimento apresentam as seguintes características:

a) o material empregado em sua construção é a platina. Embora apresente o inconveniente do alto custo, é o mais adequado, sob o ponto de vista de precisão, da estabilidade e da ausência de desvios, pelo uso e envelhecimento. Este sensor apresenta uma resistência elétrica de 100 ohms a 0 °C;

b) encapsulamento em latão, com formato semicilíndrico (Figura 13). O encapsulamento tem a finalidade de proteção contra danos mecânicos ao fio de platina. Os materiais empregados podem ser latão, aço ou aço inóx, sendo o latão o que apresenta maior condutividade térmica. A forma semicilíndrica proporciona maior contato, nas medidas de temperaturas superficiais;

c) conexão entre o sensor e o aparelho de medida é uma montagem a quatro fios (Figura 14), com comprimento de 10 metros.

Estes sensores foram calibrados nas dependências do Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. A calibração foi realizada em patamares de 5 °C. A partir dos dados obtidos durante esse processo, foram determinadas as “curvas de calibração” de cada sensor.

3.2.1.1. Localização dos sensores

Com o objetivo de avaliar o comportamento térmico, foram colocados sensores em vários níveis de profundidade de cada cobertura. Conjuntos iguais de sensores foram dispostos no centro e próximos ao apoio da laje, em cada uma das coberturas, a fim de verificar a validade de difusão unidimensional de calor. A figura 15 mostra os pontos de instalação dos sensores na bancada experimental. Os sensores que registraram a temperatura interna do ar e a temperatura de globo foram localizados a uma altura correspondente a meio pé-direito.



Figura 13 - Detalhe dos sensores tipo Pt 100 disponíveis

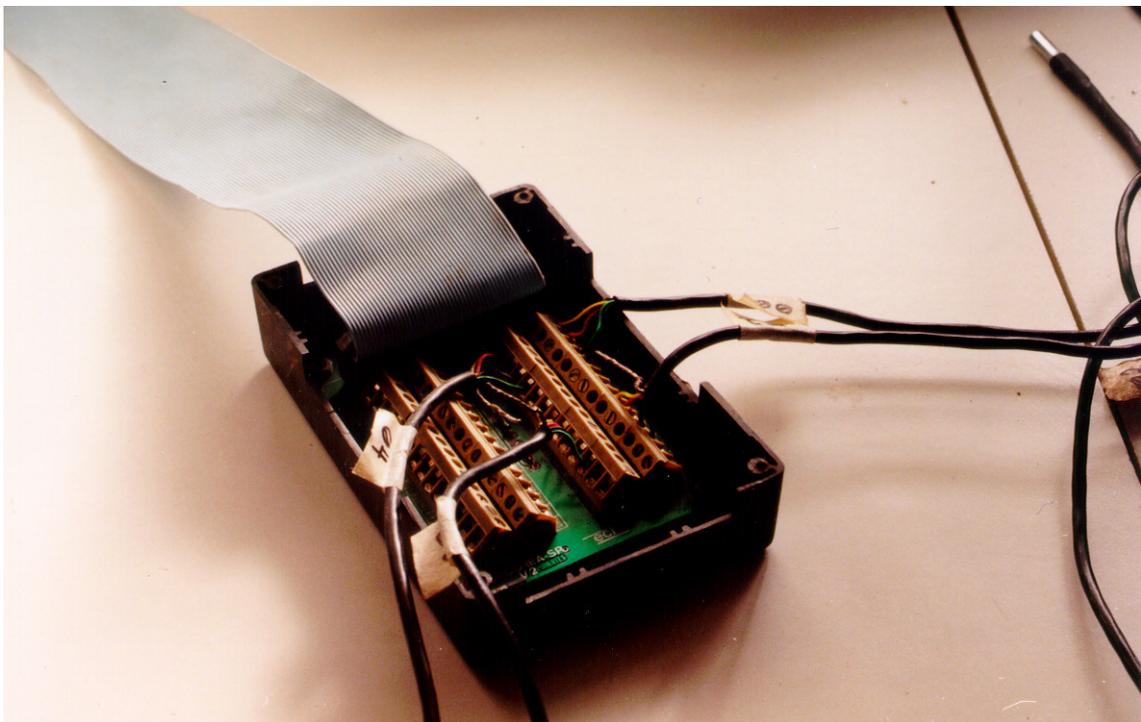


Figura 14 - Detalhe da conexão a quatro fios dos Pt 100

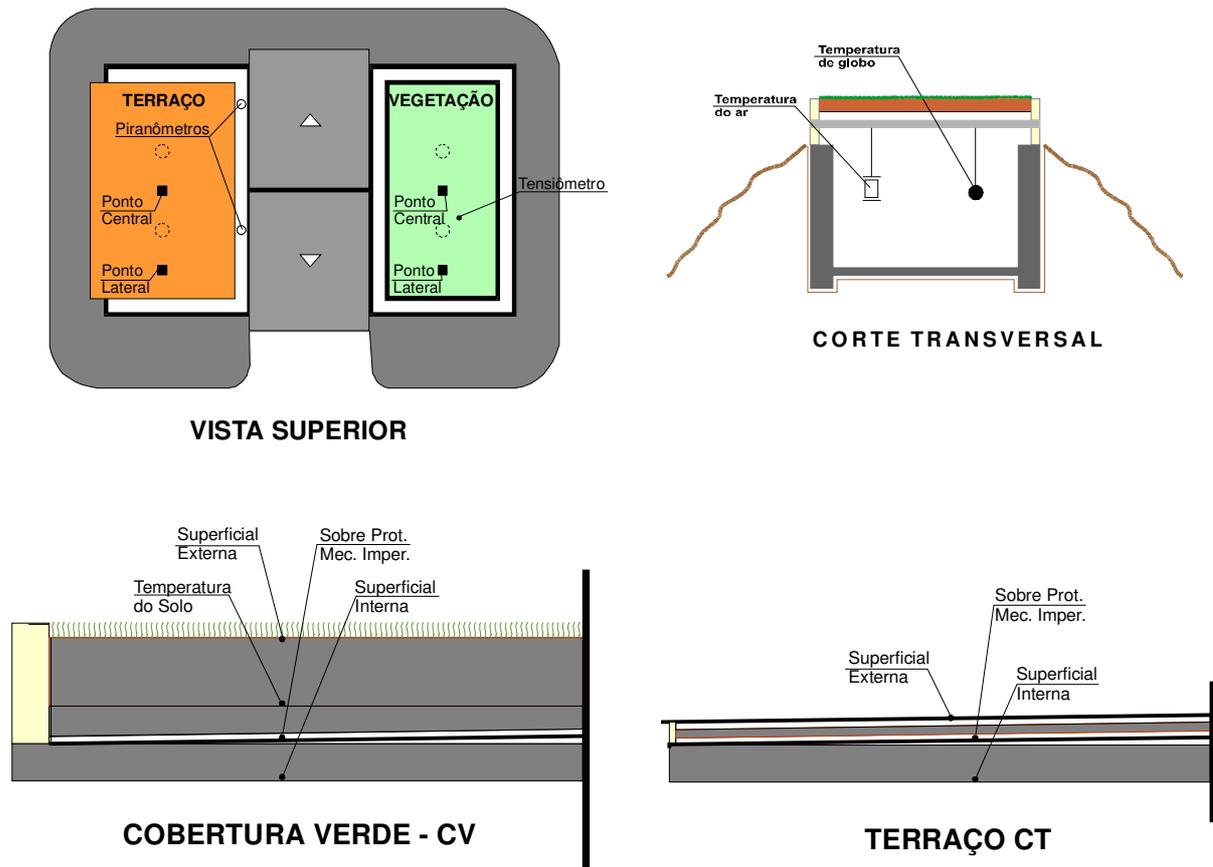


Figura 15 – Pontos de instalação dos sensores de temperatura

3.2.1.2. Instalação dos sensores de medida de temperatura superficial interna

A fim de possibilitar as medidas de temperaturas superficiais internas, os sensores Pt 100 foram instalados na parte inferior das lajes, nos pontos previstos. Para tanto, foram abertas ranhuras, com profundidade e comprimento suficientes para cobrir o sensor. Posteriormente, as ranhuras foram limpas e aplicada uma fina camada de argamassa fresca para, então, serem dispostos os sensores encobertos com pasta térmica. Finalmente, as cavas foram preenchidas, na sua totalidade, com argamassa de cimento e areia fina. Assim, estes sensores ficaram embutidos nas lajes e com recobrimento de aproximadamente 3 mm de espessura.

3.2.1.3. Instalação dos sensores de medida de temperatura sobre a camada de proteção mecânica da impermeabilização

Para realizar as medidas de temperatura sobre a camada de proteção mecânica das impermeabilizações, os sensores Pt 100 foram colocados sobre esta camada. A interface

sensor/superfície foi pincelada com pasta térmica e, após a fixação do sensor com fita crepe, foi disposta a camada seguinte, ou seja, brita na cobertura verde e isolante térmico no terraço.

3.2.1.4. Instalação dos sensores de medida de temperatura na interface solo-manta geotêxtil.

As medidas de temperatura nesta interface foram realizadas por sensores instalados imediatamente sobre a manta, envoltos em pasta térmica e soltos sobre ela. Imediatamente após, foi colocada a camada de solo, prevista no projeto. Os grãos do solo aderiram à pasta térmica, ficando encoberto o sensor. A figura 16 mostra a instalação de um destes sensores.

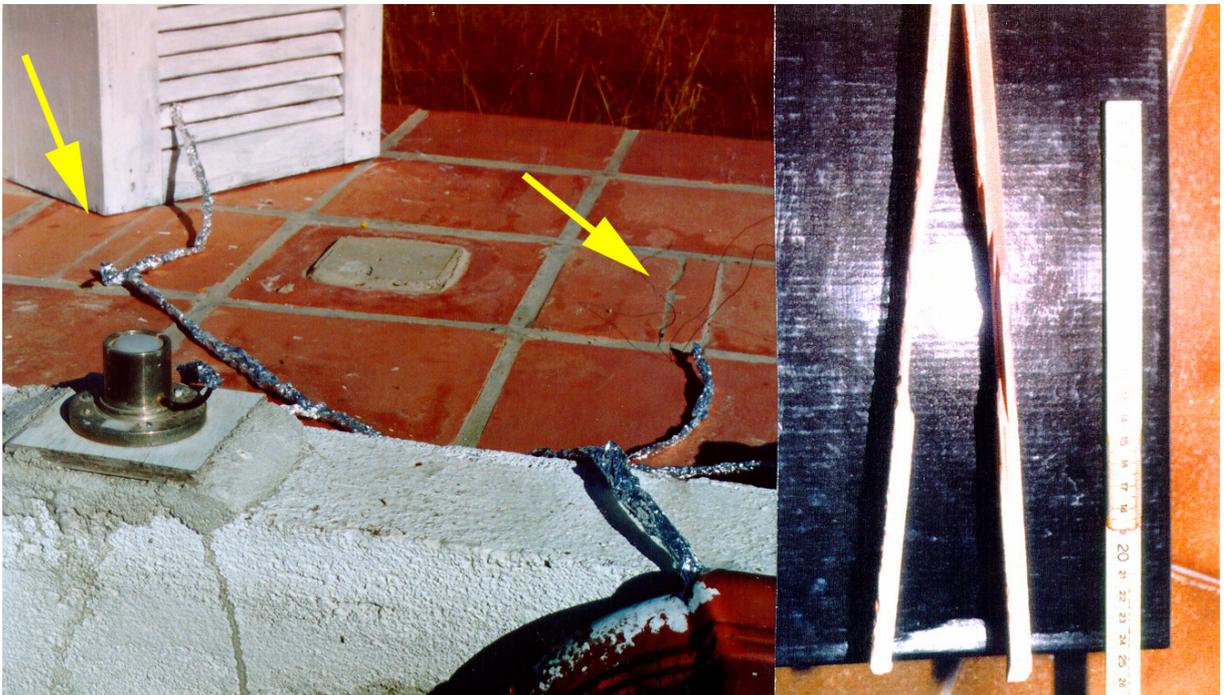
3.2.1.5. Instalação dos sensores de medida de temperatura superficial externa

Para a realização das medidas de temperatura superficial externa, os sensores foram instalados de forma diversa, em uma e outra cobertura, devido à natureza das superfícies externas de cada cobertura. Na cobertura verde, tanto os sensores quanto os respectivos fios ficaram imediatamente abaixo da grama, encobertos de tal forma que a radiação solar direta não incidisse sobre eles.

No terraço, a disposição das lajotas foi prevista de forma que cada ponto de instalação coincidissem com o centro de uma lajota. Estas lajotas foram recortadas em três pedaços cada, uma parte central com largura de 40 mm e duas partes laterais de igual largura. A parte central foi lixada com serra elétrica, de forma a reduzir sua espessura a aproximadamente 5 mm. No ponto central da faixa do meio (na parte interna) foi colado o sensor com pasta térmica e fixado com fita crepe. Posteriormente, os três pedaços foram colocados no lugar previsto, com argamassa fresca. A figura 17 mostra o detalhe da faixa central, com espessura reduzida no centro e a lajota já colocada. O restante do fio que ficou descoberto foi revestido com papel alumínio.



Figura 16- Instalação do sensor de temperatura na interface solo-manta geotêxtil



a) Vista das lajotas do piso da cobertura com terraço, onde foram instalados os sensores de temperatura superficial externa.

b) Detalhe da lajota lixada com redução de espessura, antes da colocação.

Figura 17 – Instalação dos sensores de temperatura superficial externa do terraço

3.2.1.6. Instalação dos sensores de medida de temperatura do ar

A fim de garantir que as medidas de temperatura do ar ficassem isentas dos efeitos de radiação, foi criado um dispositivo para envolver os respectivos sensores. Esta proteção é constituída de dois cilindros vazados, concêntricos e revestidos externamente com folha de papel alumínio. Desta forma é possível a circulação do ar no entorno do sensor.

Os sensores de medidas de temperatura do ar interno foram dispostos nos pontos já indicados. A figura 18 mostra o detalhe do dispositivo de proteção e o sensor já instalados.

Para as medidas de temperatura do ar externo, foi usado outro tipo de proteção do sensor, devido à presença da radiação solar. Este dispositivo é constituído por uma caixa de madeira, com paredes laterais em veneziana, pintada de branco. O sensor e a respectiva proteção foram dispostos sobre a cobertura com terraço.

3.2.1.7. Instalação dos sensores de medida de temperatura de globo

Para as medidas de temperatura de globo foram empregadas esferas metálicas pintadas de preto fosco, com diâmetro de 9 cm. No centro destas esferas foram colocados os sensores tipo Pt 100. O valor registrado pelo termômetro de globo, quando o ar está calmo, após a estabilização, é igual à temperatura média radiante das superfícies envolventes.

3.2.2. *Medidas de Radiação Solar*

As medidas de radiação solar global e difusa foram realizadas por sensores tipo piranômetros. Ainda na fase de preparação do experimento, foi possível a aquisição dos sensores, tornando possível a leitura destas variáveis, não previstas inicialmente. Os piranômetros foram desenvolvidos a partir de células fotovoltaicas (Zanenco, 1991), construídos e aferidos pelo Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que forneceu as constantes de calibração de cada sensor.

3 - Materiais e Métodos



Figura 18 - Detalhe dos dispositivos de proteção dos sensores de temperatura do ar



Figura 19 - Vista dos piranômetros instalados

3.2.2.1. Instalação dos piranômetros

A posição definitiva dos piranômetros, no experimento, é mostrada na figura 19. A instalação dos mesmos foi feita com argamassa de cimento e areia, tendo-se o cuidado de colocá-los em nível.

Inicialmente, os piranômetros foram fixados sobre as lajotas do terraço, sendo, posteriormente, transferidos para a parte superior da mureta que o circunda. A transferência foi feita para evitar o risco de emissão de radiação destas pequenas paredes (10 cm de altura) aos sensores.

Para o piranômetro que registrou a radiação difusa foi executado um dispositivo metálico, a fim de projetar uma sombra constante sobre o mesmo. O dispositivo consiste em um anel metálico, ao qual está fixado um arco móvel, também metálico, construído na Oficina Mecânica do Departamento de Engenharia Agrícola da UFPel. Para obtenção de sombra permanente sobre o piranômetro usando este dispositivo, foi adotada regulagem manual para o anel, assim como para o arco.

3.2.3. Medidas de umidade do solo

O conteúdo de água no solo foi determinado de forma indireta, através da curva de retenção de umidade. Para tanto foi necessário instalar um tensiômetro a 8,5 cm de profundidade no solo da cobertura verde e retirar amostras deste solo.

A curva de retenção de umidade foi obtida através de leituras diárias do tensiômetro e medidas do conteúdo de água no solo, obtidas pelo método gravimétrico, de amostras retiradas diariamente

Para a determinação da umidade do solo, vários meios podem ser empregados, tais como: tensiômetros, blocos de gesso com resistência elétrica, sondas de nêutrons, fórmulas de cálculo de evapotranspiração e outros. Entretanto, optou-se pelo emprego de tensiômetro, não só por ser de fácil construção e instalação, mas por seu baixo custo.

Características do tensiômetro

O tensiômetro é um instrumento de campo, que permite determinar diretamente o potencial mátrico do solo (ψ_m). Este se refere ao estado de energia da água retida pela matriz do solo, devido aos fenômenos de capilaridade e adsorção. Tais fenômenos, segundo Reichardt (1985), são totalmente dependentes do arranjo poroso, da distribuição das partículas por tamanho, da qualidade dessas partículas sólidas e da superfície específica do solo. Se o arranjo poroso não mudar, a relação potencial mátrico (ψ_m) e conteúdo de água no solo, a base de volume (θ) passa a ser uma característica intrínseca do solo, que não muda com o tempo e, por isso, também conhecida como **curva característica da água no solo** ou, simplesmente, **curva de retenção**.

O tensiômetro constitui-se de um tubo, geralmente de PVC, cheio de água, com cápsula porosa de cerâmica colada na base, rolha/cap colocada na ponta superior para vedação e um tubo de nylon de aproximadamente 3 mm de diâmetro interno, conectado a um recipiente contendo mercúrio metálico líquido, conforme esquematizado na figura 20.

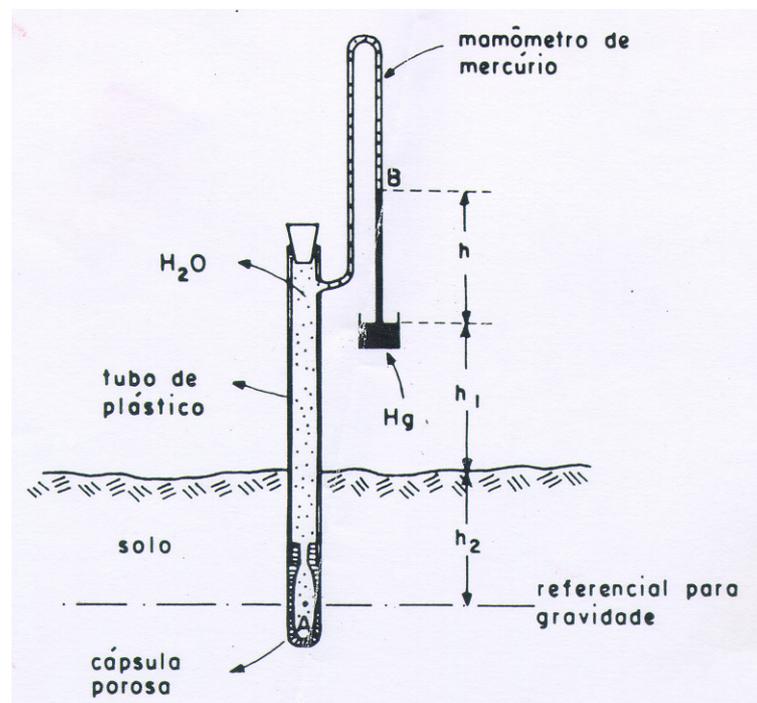


Figura 20 - Esquema das partes constituintes de um tensiômetro

Princípio de funcionamento do tensiômetro

Quando a cápsula porosa encontra o solo, a água do tensiômetro, que está hermeticamente fechado na parte superior, entra em contato com a água do solo, retida por suas partículas: portanto num estado de energia menor. Espontaneamente, tende-se a estabelecer o equilíbrio entre o estado de energia (potencial) da água no tensiômetro com o estado de energia da água no solo. Como esta normalmente apresenta menor estado de energia, ocorre saída de água do tensiômetro para o solo, ocasionando tensão interna (queda de pressão) da água no tensiômetro, equilibrada por uma coluna de mercúrio (h), que indica a tensão interna da água e que, por sua vez, o potencial de água no solo. A tensão da água do tensiômetro está em equilíbrio com a tensão da água no solo, assim, h constitui medida direta do potencial mátrico de água no solo (ψ_m).

A expressão utilizada para o cálculo do potencial mátrico da água no solo (ψ_m) é a seguinte:

$$\psi_m = - 12,6 h + h_1 + h_2 \quad (\text{cm H}_2\text{O}) \quad (\text{eq. 1})$$

sendo:

h – altura da coluna de mercúrio (centímetros);

h_1 – distância da superfície do solo à extremidade superior do mercúrio (centímetros);

h_2 – distância da superfície do solo ao meio da cápsula porosa.

O sinal negativo da expressão acima indica que a água no solo apresenta sempre uma energia potencial menor do que a energia da água em estado livre.

3.2.3.1. Instalação do tensiômetro

Antes da instalação, a fim de saturar o sistema, os tensiômetros ficaram, durante 24 horas, mergulhados em água destilada. Para a instalação no local escolhido, após a irrigação do solo, foi feito um orifício com trado apropriado, até a profundidade desejada, ou seja, até a metade da camada de solo, tendo como referência o centro da cápsula, isto é, 8,5 cm (7,5 + 1,0 cm)

Posteriormente, foram adicionados um pouco de terra solta e água dentro do orifício. Depois, foi introduzido o aparelho, até ficar na profundidade desejada, preenchendo-se, então, o orifício com terra, de forma que o instrumento ficasse firme. Em seqüência à instalação, foi

3 - Materiais e Métodos

colocada água até a borda do tubo de PVC, por meio de uma rolha perfurada. Com uma pisceta, a água foi pressionada no sistema, através do tudo de nylon, até a cuba de mercúrio, retirando-lhe, assim, todo o ar. Após este processo, foi retirada a rolha perfurada e colocada outra e a capa do tubo de PVC. As leituras são confiáveis após 24 horas de instalação, segundo Faria (1987). Duas vezes por semana, foi feita reposição de água no sistema, eliminando, assim, possíveis bolhas existentes na tubulação.

As figuras 21 e 22 mostram, respectivamente, a retirada da amostra do solo e a reposição de água no sistema do tensiômetro.

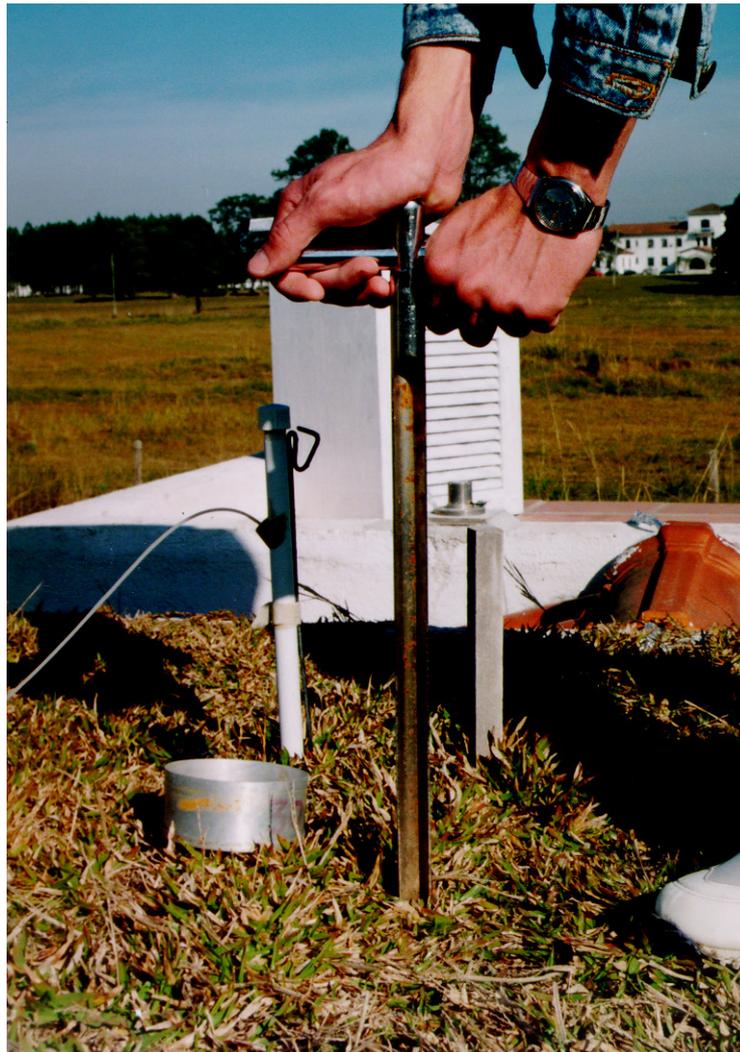


Figura 21 - Retirada de amostra do solo



Figura 22 - Reposição de água no sistema

3.3. MÉTODOS E INCERTEZA DE MEDIÇÃO

3.3.1. Medições

3.3.1.1. Intervalo entre as medições

A fim de obter dados para a avaliação da evolução térmica das coberturas, o equipamento de aquisição de dados foi programado para realizar varreduras a cada 30 minutos, durante 24 horas por dia. A frequência de aquisição de todos os canais teve de ser a mesma, pois o modelo do equipamento disponível não apresenta a possibilidade de varredura de diferentes canais, em intervalos de tempo diversos, assim como também não tem a possibilidade de realizar integração de medidas.

3 - Materiais e Métodos

As leituras do tensiômetro foram realizadas três vezes ao dia: às 8, às 12 e às 17 horas. A retirada de amostras do solo foi feita diariamente às 8 horas e, eventualmente, em outros horários, quando o valor registrado no tensiômetro era muito elevado.

3.3.1.2. Período

As medições ocorreram em dois períodos, no verão, nos meses de janeiro e março. No inverno, nos meses de maio e junho de 1996.

3.3.2. Método Estatístico

Com o objetivo de comparar estatisticamente os dados referentes às variáveis medidas em uma e outra cobertura, foi adotado, para o experimento, um modelo estatístico tipo Análise Fatorial de 3 Fatores Sem Repetição.

Quando um fator se apresentou significativo, a significância entre as médias nos diferentes níveis deste fator foi testada por uma comparação múltipla de médias e pelo teste de Duncan, adotando um nível de significância de 5%.

a) Temperaturas superficiais (externa, interna e na camada de proteção mecânica da impermeabilização)

Para estas variáveis, os fatores considerados no projeto são: dia (A), tipo de cobertura (B) e posição do sensor (C). Para cada uma delas foram feitas duas análises, correspondentes aos horários de temperatura mínima (6 horas) e máxima (14 horas) da temperatura do ar externo. O quadro a seguir mostra o projeto estatístico adotado.

Quadro 1 - Projeto estatístico adotado para análise das temperaturas superficiais (externa, interna e na camada de proteção mecânica da impermeabilização)

FATOR A	Dia	Aleatório	7 NÍVEIS (i = 1,2,3,4)
FATOR B	Tipo de Cobertura (Terraço - 1 / Vegetação - 2)	Fixo	2 NÍVEIS (j= 1,2)
FATOR C	Posição do Sensor (Central -1 / Lateral -2)	Fixo	2 NÍVEIS (k = 1,2)

3 - Materiais e Métodos

Desta forma, é possível verificar se:

- os tipos de cobertura – vegetação e terraço – apresentam comportamentos diferentes entre si em relação as variáveis analisadas (temperaturas superficiais externa e interna e na impermeabilização), caso o fator B – tipo de cobertura - seja ou não significativo.
- a hipótese de fluxo unidimensional de calor é ou não verdadeira, caso o fator C – Posição do sensor – seja ou não significativo. Não sendo significativo, indica que as variáveis lidas em uma e outra posição não apresentam diferenças consideráveis entre si; portanto, o fluxo de calor pode ser considerado unidimensional, ou seja, que não há fuga de calor para os apoios.

b) Temperatura do ar interno e temperatura de globo

Para estas variáveis, o modelo estatístico aplicado é o mesmo. Os fatores A e B são iguais (dia e tipo de cobertura, respectivamente); o fator C passa a ser medida interna (temperatura do ar e temperatura de globo). Foram feitas duas análises, correspondentes aos horários de temperatura mínima (9 horas) e máxima (19 horas) da temperatura do ar interno. O quadro 2, a seguir, mostra o projeto estatístico adotado.

Quadro 2- Projeto estatístico adotado para análise das temperaturas do ar interno e de globo

FATOR A	Dia	Aleatório	7 NÍVEIS (i = 1,2,3,4)
FATOR B	Tipo de Cobertura (Terraço - 1 / Vegetação - 2)	Fixo	2 NÍVEIS (j= 1,2)
FATOR C	Medida Interna (Temp. Ar -1 / Temp. globo -2)	Fixo	2 NÍVEIS (k = 1,2)

Desta forma, é possível verificar se:

- os tipos de cobertura – vegetação e terraço – apresentam comportamentos diferentes entre si, em relação às variáveis internas (temperaturas do ar interno e de globo) medidas nas câmaras sob cada cobertura, caso o fator B – tipo de cobertura - seja ou não significativo.
- internamente, nas câmaras sob cada cobertura, a temperatura média radiante das superfícies circundantes é maior ou menor que a temperatura do ar, ou seja, se há

ou não ganhos de calor por radiação. Caso o fator C seja significativo, a significância das diferenças entre as temperaturas do ar e de globo será testada.

3.3.3. Método Gravimétrico

A fim de estimar a curva de retenção de água do solo empregado na cobertura verde, foi necessário relacionar vários pares de valores de umidade obtida pelo método gravimétrico e o potencial mátrico. Para tanto, foram coletadas várias amostras de solo. Sempre foram coletadas duas amostras em cada retirada e calculado o valor médio da umidade neste horário.

No método gravimétrico (EMBRAPA, 1997), as amostras, após a retirada com trado manual, são colocadas em cápsulas de alumínio, pesadas em balanças de precisão (SU), colocadas em estufa por um período mínimo de 24 horas e pesadas novamente (SSE). Tais pesagens e secagens foram realizadas no Laboratório de Solos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel - UFPel.

Para a obtenção do valor do conteúdo de água é utilizada a seguinte expressão:

$$U_g (\%) = \left\{ (SU - SSE) / SSE \right\} \times 100 \quad (\text{eq. 2})$$

sendo:

U_g – umidade a base de peso (gravimétrica)

SU – peso do solo úmido

SSE - peso do solo seco em estufa

Para transformar o dado de umidade à base de peso em umidade à base de volume (θ) é utilizada a seguinte equação:

$$\theta = (U_g \cdot ds/da) \times 100 \quad (\%) \quad (\text{eq. 3})$$

sendo:

θ - umidade do solo, à base de volume;

U_g – umidade à base de peso;

ds – densidade do solo;

da – densidade da água

Com os valores do potencial mátrico, obtidos a partir da leitura do tensiômetro, e do conteúdo de água (θ) é possível obter a curva de retenção de água. A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico, (EMBRAPA, 1997).

3.3.4. Incerteza de Medição

As grandezas físicas são caracterizadas por três partes, a saber: um valor numérico, um erro e normalmente uma unidade, que pode não existir, se a grandeza for adimensional. O valor numérico pode ser determinado através de uma medição e terá pouco valor, caso não se conheça o erro desta medição.

O erro pode ser separado em dois tipos: sistemático e aleatório. Erro aleatório é aquele que ocorre em situações que envolvem diversas medidas de uma mesma variável, em determinadas condições. Este erro não será considerado no trabalho, pois, os sensores permaneceram fixos e não havia interferência humana nas leituras. Além disto, não houve repetições.

O erro sistemático está relacionado com a exatidão dos equipamentos e sensores e apresenta um valor previsível, pois é função de suas características e respectivas calibrações.

A sensibilidade dos conversores analógicos/digitais usados em equipamentos tipo *data logger* está associada ao seu número de bits. O equipamento utilizado no experimento possui 48 canais de entrada e 12 bits de resolução. A incerteza de medição foi determinada para os dois tipos de variáveis, lidas pelo *data logger*, ou seja, temperatura e radiação solar.

Quanto aos sensores de temperatura, o erro sistemático apresentado, em cada um dos Pt 100, foi determinado durante a calibração e corrigido pelas respectivas curvas de calibração. Quanto ao equipamento *data logger*, as leituras de temperatura foram realizadas de acordo com os seguintes dados de entrada: sensor Pt 100, a quatro fios, com a faixa de temperatura de $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+750\text{ }^{\circ}\text{C}$, correspondente ao - FE (fundo de escala) e + FE, respectivamente. Assim, o incremento de cada contagem é $\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

As leituras dos piranômetros foram feitas com medidas diretas de tensão diferencial, com fundo de escala de 40 mV. Portanto, o incremento de cada leitura é de $\pm 0,01\text{ mV}$. A incerteza de medição de cada piranômetro foi determinada em função da respectiva constante de calibração, que resultou da aferição realizada.

A tabela 3 apresenta, resumidamente, os valores de incerteza de medição para os sensores de temperatura Pt 100 e para os piranômetros.

Tabela 3 - Valores de incerteza de medição para os sensores usados

Sensor	Incerteza de Medição
Pt 100	$\pm 0,1$ °C
Piranômetro 1 (radiação total)	$\pm 0,59$ W/m ²
Piranômetro 2 (radiação difusa)	$\pm 0,55$ W/m ²

3.4. MEDIÇÕES PRELIMINARES

Após a instalação do conjunto de sensores na bancada experimental, conforme descrito anteriormente, deu-se início às medições preliminares. Estas ocorreram em duas etapas, na segunda quinzena de dezembro / 95. A primeira durou uma semana e a segunda, cinco dias.

As medições da primeira etapa induziram a quatro alterações. Uma delas relaciona-se à substituição dos micro-tensiômetros inicialmente instalados por tensiômetro convencional. Os dois micro-tensiômetros não apresentaram condições práticas de serem mantidos no experimento. Surgiram dois tipos de problemas: vazamentos nos locais de emenda e ineficiência do método de reposição de água no sistema. Este método não funcionou em campo, em virtude do pequeno diâmetro dos tubos, o que ocasionou pressão insuficiente para a retirada das bolhas de ar próximas à cápsula. Em laboratório, pelo uso de bomba de vácuo, foi possível fazer a reposição necessária da água no sistema. Desta forma, os micro-tensiômetros foram retirados e, em seu lugar, foi colocado um tensiômetro convencional, instalado conforme descrição no item anterior.

Outra alteração ocorreu no intervalo das leituras da aquisição automática: as medições a cada 15 minutos, como inicialmente testado, apresentavam pouca ou nenhuma modificação no valor de uma mesma variável, tornando muito grande o número de dados. Assim, o intervalo entre duas medições consecutivas passou a ser de 30 minutos.

A terceira alteração diz respeito à posição dos piranômetros. Estes sensores foram reinstalados. Desta vez, sobre a mureta que circunda a cobertura com terraço, ficando em nível mais elevado. Assim, as leituras de radiação não sofreriam mais a influência de superfícies acima dos piranômetros.

3 - Materiais e Métodos

Finalmente, a quarta alteração foi a substituição do dispositivo de proteção contra radiação do sensor de temperatura usado no exterior da bancada. O primeiro dispositivo (tubos de PVC) instalado não se mostrou eficiente, nos horários de radiação solar máxima, pois, o sensor registrava, nestes intervalos, temperaturas do ar externo acima das registradas na Estação Agroclimatológica. O dispositivo de proteção substituto foi aquele descrito no item 3.3.1.6.

Após estas alterações, foi realizada a segunda etapa de medições preliminares, período em que não surgiram outras alterações.

4. RESULTADOS OBTIDOS E ANÁLISE DOS DADOS

Este capítulo tem o objetivo de, além de apresentar os dados obtidos, analisar e discutir o desempenho térmico das coberturas estudadas, em condições de verão e de inverno. A avaliação do retardo e do amortecimento térmico é feita de forma comparativa entre uma e outra cobertura.

A fim de detalhar o estudo comparativo entre as coberturas, outras análises são feitas, como:

- a) verificação estatística da hipótese de fluxo unidimensional;
- b) avaliação do comportamento das variáveis internas da bancada, tais como temperatura do ar e temperatura de globo;
- c) comparação entre os gradientes superficiais, nos vários níveis monitorados.

4.1. ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE VERÃO

As medições de verão ocorreram durante os meses de janeiro e março de 1996. Janeiro registrou dados climáticos atípicos, comparados aos valores das normais climatológicas (1961/1990): mês chuvoso, com temperaturas médias e radiação solar inferiores aos valores das normais, conforme pode ser observado na tabela abaixo. Por isso, as medições foram realizadas também durante o mês de março. Este apresentou temperaturas médias e radiação solar superiores aos valores das normais, e inferiores quanto à precipitação pluviométrica e aos dias chuvosos. A tabela 4 mostra alguns dados médios mensais, registrados nos meses de janeiro e março e dados das normais climatológicas (1961/1990).

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Tabela 4 - Dados climatológicos dos meses de janeiro e março / 96

Elementos	Mês			
	JANEIRO/96		MARÇO/96	
	Registrado	Normal	Registrado	Normal
Temperatura Média ($^{\circ}\text{C}$)	22,9	23,2	22,4	21,6
Temperatura Média das Máximas ($^{\circ}\text{C}$)	27,0	28,2	27,0	26,7
Temperatura Média das Mínimas ($^{\circ}\text{C}$)	19,9	18,6	19,1	17,2
Umidade Relativa (%)	82,3	76,1	79,7	79,8
Precipitação Pluviométrica (mm)	157,4	116,4	35,4	113,0
Número de dias chuvosos	16,0	10,3	10,0	10,2
Radiação Solar (J/m^2) ($\times 10^6$)	18,10	21,10	17,70	15,40
Número de horas de Insolação	186,3	264,5	243,2	210,3

Fonte: Estação Agroclimatológica de Pelotas - Convênio EMBRAPA / UFPel / INMET

Os dados experimentais de verão, apresentados neste trabalho, são relativos a uma semana do mês de janeiro e a outra do mês de março. A semana escolhida no mês de janeiro foi a de 08 a 14, devido às condições climáticas diversas: dias claros, com temperatura elevada, chegando a máxima a $35,2^{\circ}\text{C}$ e dias chuvosos, com temperatura em declínio acentuado. Durante o mês de março, foi possível selecionar uma semana - de 07 a 13 - com condições climáticas constantes, ou seja, tempo bom, céu claro e temperatura estável, máxima em torno de $28,5^{\circ}\text{C}$ e mínima em torno de $20,5^{\circ}\text{C}$, ideal para analisar o comportamento térmico, conforme proposto por Hoyano (1984), Harazono et al. (1991) e Wall (1992).

4.1.1. Dados Climáticos

Os dados climáticos que caracterizam cada dia das semanas selecionadas são apresentados a seguir. As tabelas 5 e 6, abaixo, mostram os dados climáticos levantados e fornecidos pela Estação Agroclimatológica de Pelotas - Convênio EMBRAPA / UFPel / INMET.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Tabela 5 - Dados climáticos da semana 08 a 14 de janeiro / 96

Elementos	Dia						
	8	9	10	11	12	13	14
Temperatura Média ($^{\circ}$ C)	22,2	25,1	25,2	27,6	22,9	22,6	20,8
Temperatura Máxima ($^{\circ}$ C)	27,4	31,6	30,6	35,2	27,8	28,2	24,6
Temperatura Mínima ($^{\circ}$ C)	15,2	21,0	20,0	22,8	20,0	19,8	18,2
Umidade Relativa (%)	81,5	80,5	75,8	75,3	80,5	85,8	65,3
Prec. Pluviométrica (mm)	-	-	-	3,5	31,5	-	-
Radiação Solar (J/m^2) ($\times 10^6$)	26,66	26,96	28,46	21,35	14,61	20,60	27,29
N $^{\circ}$ horas de Insolação	12,5	11,8	11,7	5,2	5,1	6,7	12,7
Velocidade do Vento (m/s)	1,9	1,6	3,0	2,7	1,6	1,9	3,0
Direção do Vento	NE	S	NE	NE	SW	SE	E
Condições do Céu	C/Pn	C/Pn	Nv / C	C/PN/N	N/PN	Nv/N/PN	C/Pn

Fonte: Estação Agroclimatológica de Pelotas - Convênio EMBRAPA / UFPel / INMET

Tabela 6 - Dados climáticos da semana 07 a 13 de março / 96

Elementos	Dia						
	7	8	9	10	11	12	13
Temperatura Média ($^{\circ}$ C)	24,2	24,0	22,7	22,8	23,5	24,4	25,8
Temperatura Máxima ($^{\circ}$ C)	27,8	28,0	28,4	27,2	28,0	28,6	32,0
Temperatura Mínima ($^{\circ}$ C)	21,0	21,0	19,0	19,0	20,2	21,2	22,4
Umidade Relativa (%)	85,3	82,0	89,0	82,0	76,8	78,5	77,0
Prec. Pluviométrica (mm)	-	-	-	-	-	-	0,4
Radiação Solar (J/m^2) ($\times 10^6$)	17,68	22,17	18,54	19,71	21,60	22,46	19,83
N $^{\circ}$ horas de Insolação	8,0	10,4	8,9	9,3	10,4	9,9	8,1
Velocidade do Vento (m/s)	2,4	1,7	4,6	2,8	3,9	3,4	1,5
Direção do Vento	E	E	SE	NE	NE	NE	NW
Condições do Céu	N/PN/C	Pn / C	Nv/PN/C	Nv/C/PN	C / Pn	C	C / PN

Fonte: Estação Agroclimatológica de Pelotas - Convênio EMBRAPA / UFPel / INMET

Legendas: **C** – claro; **Pn** – pouca nebulosidade; **PN** - parcialmente nublado; **N** – nublado;
Nv – nevoeiro.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

As figuras 23 e 24 apresentam dados climáticos registrados no experimento. O gráfico da figura 23 mostra a evolução das temperaturas externas durante as semanas de 08 a 14 de janeiro e de 07 a 13 de março. O gráfico da figura 24 mostra as radiações global e difusa nos mesmos períodos. Os valores de radiação difusa são aqueles obtidos diretamente por leitura do piranômetro, sem correção devido a obstrução gerada pelo dispositivo de sombreamento.

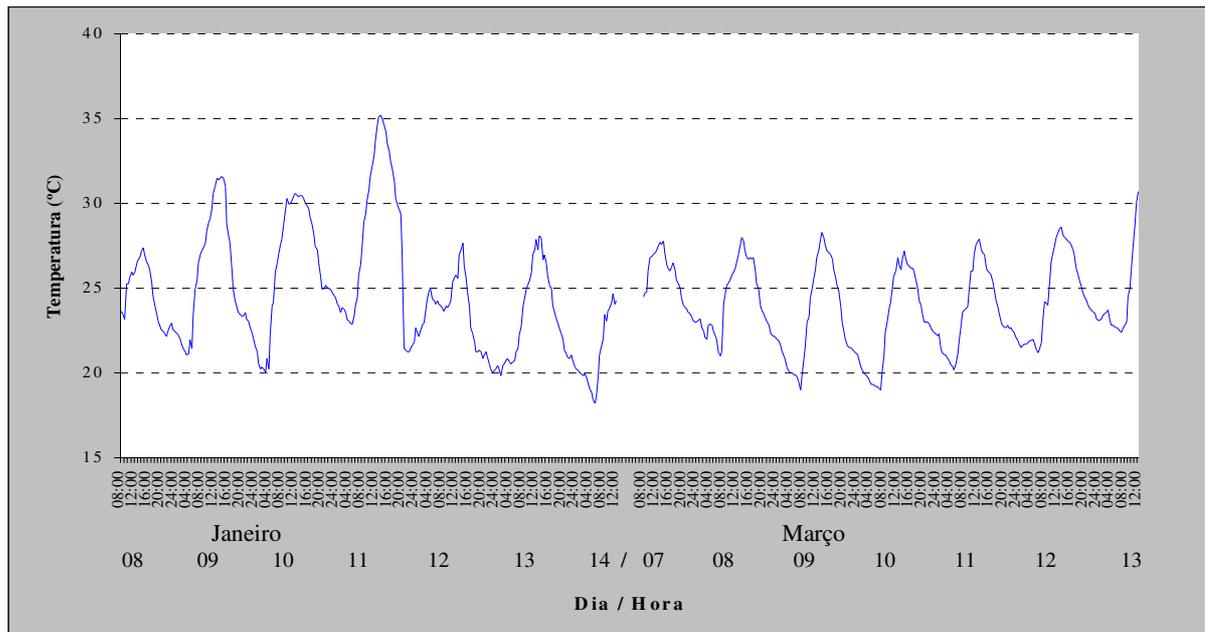


Figura 23 – Gráfico de temperatura do ar externo nas semanas selecionadas de verão

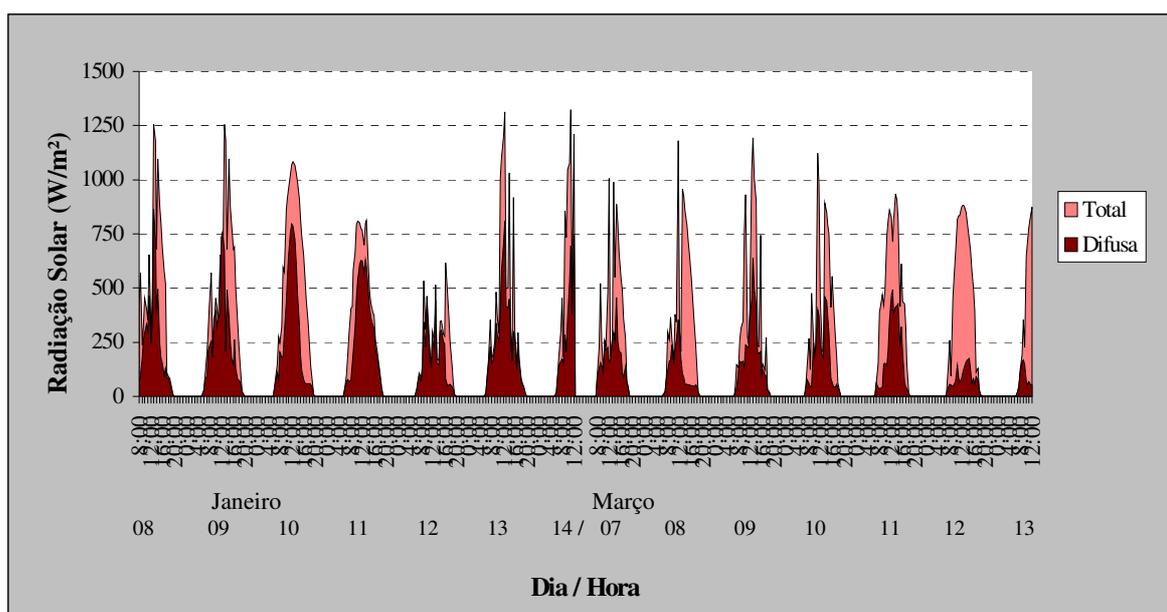


Figura 24 – Gráfico de radiação solar total e difusa nas semanas selecionadas de verão

12. Durante o período de março, quando a condições climáticas permaneceram mais ou menos constantes, o gradiente diário também se manteve estável, em torno de 8 °C.

Na semana do mês de janeiro, a temperatura superficial externa atingiu o valor máximo de 35,9 °C e mínimo, de 19,0 °C, gerando um gradiente, nesta semana, de 16,9 °C; já na semana do mês de março, o valor máximo atingido foi 29,8 °C e o mínimo, 20,7 °C, com variação semanal de 9,1 °C.

O comportamento da curva que descreve a evolução da temperatura superficial externa repete-se a cada dia. A curva apresenta três trechos diários distintos: um acentuadamente crescente a partir das 6 horas da manhã, até atingir um valor máximo em torno das 14 horas. A partir de então, outro acentuadamente decrescente, até mais ou menos as 21 horas, e o terceiro, na madrugada, também decrescente, porém de forma menos acentuada, até atingir um valor mínimo, em torno de 6 horas. Este comportamento é descaracterizado no dia 12/01: dia chuvoso, totalmente nublado, com baixa incidência de radiação solar e temperatura em acentuado declínio.

Quanto à temperatura na interface solo/manta geotêxtil, a temperatura máxima atingida, em janeiro, foi de 28,5 °C e a mínima, 22,4 °C. Em março, a temperatura máxima atingida nesta interface foi de 26,1 °C e a mínima, 22,5 °C. Os gradientes diários desta temperatura variaram de 1,8 a 3,2 °C, no período de março, quando as condições climáticas são mais estáveis e de 0,9 a 4,7 °C, em janeiro, quando as condições foram mais variáveis.

Em relação à temperatura na camada de proteção mecânica da impermeabilização, as variações diárias oscilaram de 0,3 °C a 2,9 °C, em janeiro e de 0,7 °C a 1,6 °C, em março. Em janeiro, a temperatura nesta camada atingiu o valor máximo de 27,7 °C, e em março, 25,2 °C. Os valores mínimos foram, respectivamente, 23,3 °C e 23,3 °C.

A temperatura superficial interna é a que menos sofre variações diárias, acompanhada de perto pela temperatura superficial da camada de proteção mecânica da impermeabilização. Estas variações oscilam de 0,1 °C a 2,3 °C. Em março, as variações também são menores, variando de 0,6 °C a 1,4 °C. Os valores máximos atingidos são: 27,5 °C em janeiro e 25,2 °C em março, sendo os valores mínimos, 23,7 e 23,6 °C, respectivamente.

Tabela 8 - Temperaturas superficiais máximas e mínimas nas camadas constituintes da cobertura com vegetação
Semana de 07 a 13 de março/1996

Dia e Hora	Dia 07/03				Dia 08/03				Dia 09/03				Dia 10/03												
	Temperaturas Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)												
Nível	14:30	17:00	20:00	22:30	6:00	8:00	9:30	10:00	15:00	16:30	18:30	21:00	7:00	8:00	9:30	11:00	14:00	16:00	18:00	20:00	6:00	7:30	9:30	10:00	
Externo	27.3				21.5			28.8				21.0				29.8					20.7				
Solo	24.8 (2.5)				23.0 (-1.5)			25.8 (3.0)				22.9 (-1.9)				26.0 (3.8)					23.0 (-2.3)				
Imperm	24.0 (0.8)				23.3 (-0.3)			24.9 (0.9)				24.9 (0.1)				23.6 (-0.7)					25.0 (1.0)				23.6 (-0.6)
Interno	24.0				(-)			23.6 (-0.3)			24.8		24.9 (0.1)			23.8 (-0.2)				24.9 (0.1)					23.9 (-0.3)

continua...

continuação

Dia e Hora	Dia 10/03				Dia 11/03				Dia 12/03				Dia 13/03												
	Temperaturas Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)												
Nível	14:30	15:30	17:30	21:30	6:00	8:00	9:30	10:00	14:00	16:00	18:30	21:00	6:30	7:00	10:00	10:30	14:30	16:00	19:00	22:00	6:00	7:30	9:30	10:00	
Externo	28.9				20.7			29.6				21.5				30.5					22.7				
Solo	25.3 (3.6)				22.5 (-1.8)			25.1 (4.5)				22.9 (-1.4)				26.1 (4.4)					24.0 (-1.3)				
Imperm	24.6 (0.7)				23.3 (-0.8)			24.5 (0.6)				24.6 (0.6)				23.4 (-0.5)					25.2 (0.9)				24.4 (-0.4)
Interno	24.7				(-0.1)			23.7 (-0.4)			24.6 (-0.1)		24.6 (-0.1)			23.8 (-0.4)				25.2 (-)					24.6 (-0.2)

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Os dados da tabela 7 mostram que os valores extremos da temperatura superficial da face externa se refletiram na interface solo/manta com diferenças, que variaram de 1,3 °C a 9,0 °C e com retardo que oscilou de 1,5 até 11,0 horas. Entre os sensores instalados na interface solo/manta e na impermeabilização, as medições registraram diferenças entre os valores extremos de 0,3 a 1,5 °C e com retardo térmico de 0,5 a 6,0 horas. Na última camada constituinte desta cobertura, as diferenças entre os valores extremos, ocorridos na impermeabilização e na superfície interna, oscilaram entre 0,0 e 0,4 °C, com retardo térmico de 0,5 a 2,5 horas.

Assim, em janeiro, os valores máximos e mínimos da temperatura superficial externa refletiram-se na superfície interna com amortecimento de 1,8 a 9,9 °C e com atraso térmico de 2,5 a 11 horas e em março, de acordo com a tabela 8, foram, respectivamente de 2,1 a 5,3 °C e de 4 a 8 horas. Cabe salientar que os valores mais baixos são referentes às temperaturas mínimas.

A figura 26, que se segue, mostra as curvas de diferença entre as temperaturas superficiais nas várias camadas constituintes da cobertura verde. Observa-se, no gráfico, que as curvas descrevem um comportamento, também esperado: considerando camadas consecutivas, a curva mais acentuada é a que registra as diferenças entre as temperaturas superficial externa e a na interface solo/manta. Quando a temperatura superficial externa sofre grandes acréscimos, isto é, nos períodos de insolação, as diferenças são maiores. Tal diferença chegou a atingir 10,5 °C, em janeiro e, 6,4 °C, em março. Considerando toda a espessura da cobertura, a diferença entre as temperaturas superficial externa e interna chegou a 11,5 °C.

A curva que apresenta menores variações é a representada pela diferença entre as temperaturas na impermeabilização e a superficial interna. A maior diferença entre estes dois níveis chegou, em janeiro, a 1,3 °C e, em março, a 0,5 °C. As curvas indicam que, em todas as camadas, ao longo do dia, houve inversão do fluxo de calor, ora era de fora para dentro e ora, de dentro para fora. Nas madrugadas, o fluxo de calor ocorreu de dentro para fora.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

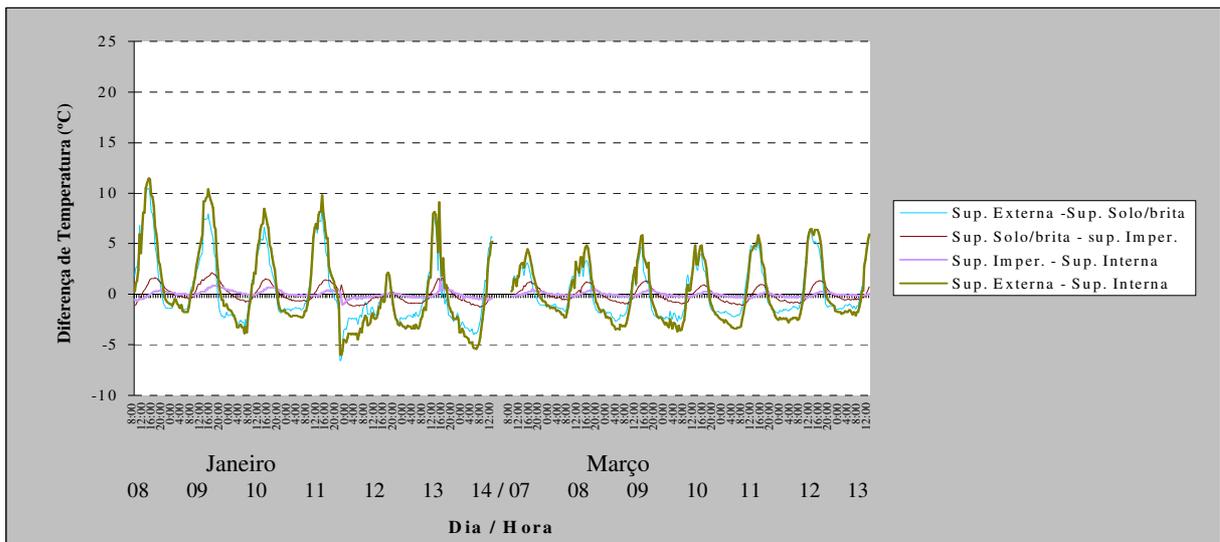


Figura 26 – Gráfico das diferenças de temperaturas superficiais nas camadas constituintes da cobertura com vegetação, nas semanas selecionadas de verão

4.1.2.2. Temperaturas do ar interno e de globo

A figura 27 mostra a evolução dos dados das temperaturas do ar externo e do ar interno e de globo, registrados no interior da câmara sob a cobertura com vegetação, durante as semanas analisadas no período de verão. Conforme descrito no item 3.2.1.7, para as medições da temperatura de globo, foram utilizados globos com 9 cm de diâmetro, portanto, estes valores são ligeiramente diferentes daqueles registrados com o globo padrão (15 cm), por alteração dos coeficientes de trocas por convecção.

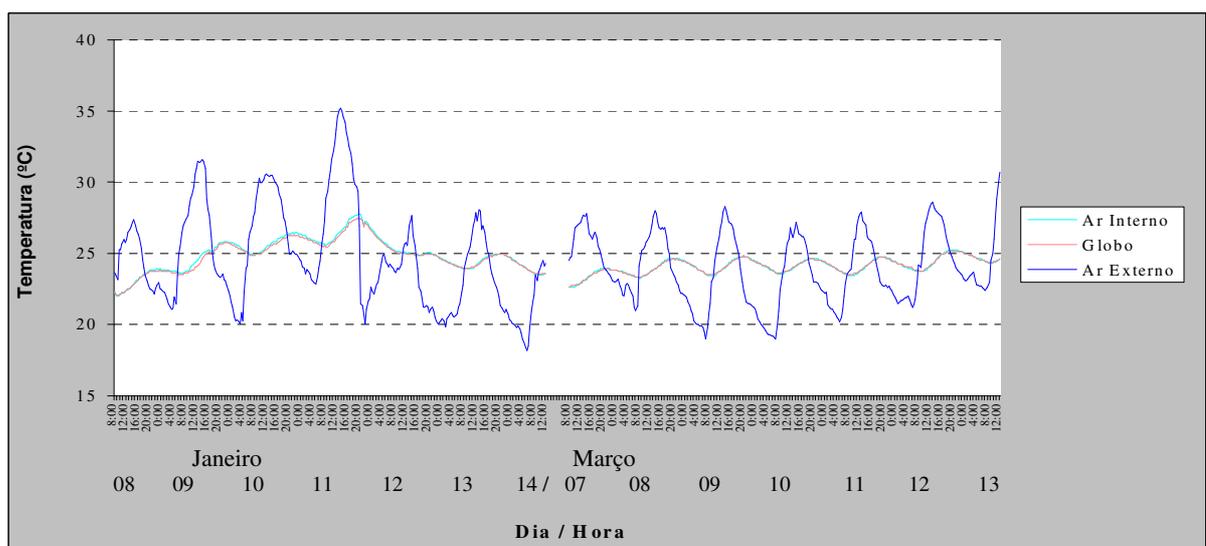


Figura 27 – Gráfico de temperaturas do ar externo e interno e temperatura de globo, na cobertura com vegetação, nas semanas selecionadas de verão

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

As tabelas 9 e 10, abaixo, complementam as informações do gráfico anterior, apresentando os valores máximos e mínimos das temperaturas do ar externo e interno, além dos horários de ocorrência dos mesmos e a diferença entre elas.

Tabela 9 – Valores máximos e mínimos das temperaturas do ar externo e interno na cobertura com vegetação – Semana de 08 a 14 de janeiro / 96

Dia e Hora	Dia 08/01	Dia 09/01				Dia 10/01				Dia 11/01
	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)
Variável	14:30 22:30	3:30 7:00	14:00 21:30		3:00 8:00	12:00 21:00			5:00 8:30	
Ar Externo	27.4	21.0				20.0				22.8
Ar Interno - CV -	23.9 (3.5)	23.5 (-2.5)				24.9 (-4.9)				25.6 (-2.8)

continua...

continuação

Dia e Hora	Dia 11/01	Dia 11 e 12/03				Dia 13/01				Dia 14/01
	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)
Variável	13:30 19:30	22:00 16:30	14:00 19:00		1:30 7:00	13:00 19:30			5:30 9:00	
Ar Externo	35.2	20.0				19.8				18.2
Ar Interno - CV -	27.8 (7.4)	24.9 (-4.9)				23.9 (-4.1)				23.5 (-5.3)

Tabela 10 - Valores máximos e mínimos das temperaturas do ar externo e interno na cobertura com vegetação - Semana de 07 a 13 de março / 96

Dia e Hora	Dia 07/03	Dia 08/03				Dia 09/03				Dia 10/03
	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)
Variável	14:00 19:00	7:00 8:00	13:30 18:00		7:00 7:30	13:30 18:00			7:00 7:30	
Ar Externo	27.8	21.0				19.0				19.0
Ar Interno - CV -	23.9 (3.9)	23.2 (-2.2)				23.4 (-4.4)				23.5 (-4.5)

continua...

continuação

Dia e Hora	Dia 10/03	Dia 11/03				Dia 12/03				Dia 13/03
	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)
Variável	14:00 18:00	5:00 7:30	12:30 18:00		6:00 7:00	13:00 18:30			7:00 7:30	
Ar Externo	27.2	20.2				21.2				22.4
Ar Interno - CV -	24.6 (2.6)	23.4 (-3.2)				23.7 (-2.5)				24.3 (-1.9)

COMENTÁRIOS

O gráfico da figura 27 mostra, qualitativamente, que não é significativa a diferença entre as temperaturas do ar interno e a de globo. As curvas são bastante próximas, não havendo, muitas vezes, qualquer diferença entre elas; em janeiro, chegou à 0,5 °C, enquanto que em março, chegou a 0,1 °C, o que pode ser desprezado em função da incerteza de medição ($\pm 0,1$ °C). Isto indica não haver efeito considerável de radiação no interior desta câmara. A temperatura de globo foi praticamente igual à temperatura do ar interno; assim, a diferença verificada entre as temperaturas do ar interno e superficial interna da laje (-0,8 a 0,7 °C) foi, provavelmente, compensada pelas temperaturas superficiais das paredes e do piso.

Nesta mesma figura, pode-se observar que a evolução da temperatura do ar interno tem comportamento semelhante ao do ar externo, porém com oscilações diárias bem menores e com retardo térmico.

Em janeiro, durante a semana analisada, a temperatura do ar interno atingiu o valor máximo de 27,8 °C, no dia 11, quando a temperatura do ar externo também alcançou o máximo (35,2 °C), conforme pode ser verificado na figura 27 e na tabela 9. O valor mínimo registrado, internamente, foi de 23,5 °C, nos dias 09 e 14.

As oscilações diárias da temperatura do ar interno variaram de 0,2 °C a 2,9 °C, enquanto as da temperatura do ar externo variaram de 6,4 °C a 15,2 °C, embora seja grande a diferença registrada entre estas amplitudes, as temperaturas médias do ar externo e interno foram bastante próximas: 24,8 °C e 24,9 °C, respectivamente.

Em março, a temperatura do ar interno atingiu o valor máximo (25,3 °C) no dia 12, e o mínimo (23,2 °C) foi observado no dia 8. A temperatura do ar externo também chegou ao valor mais elevado (28,6 °C) no dia 12, conforme pode ser verificado no gráfico da figura 27 e na tabela 10. As variações diárias da temperatura do ar interno, registradas durante esta semana, oscilaram entre 0,7 °C e 1,6 °C, enquanto, externamente, a oscilação ficou entre 6,0 °C e 9,4 °C; mesmo assim, as temperaturas médias, no período, foram iguais: 24,2 °C.

Os valores extremos (máximos e mínimos) externos manifestaram-se internamente com diferenças entre eles, que variaram, em janeiro, de 2,5 °C a 7,4 °C e, em março, de 1,9 °C a 4,5 °C, conforme indicado nas tabelas acima. Além disso apresentaram retardo térmico que oscilaram entre 3,5 e 18,5 horas, em janeiro e, entre 0,5 e 5,5 horas em março.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

As diferenças entre as temperaturas do ar externo e interno evoluíram, nas semanas de verão, de acordo com as curvas do gráfico da figura 28. As maiores variações (8,6 °C) ocorreram em janeiro, quando a temperatura externa também sofreu maiores oscilações. Em março, esta diferença chegou a um valor máximo de 6,1 °C.

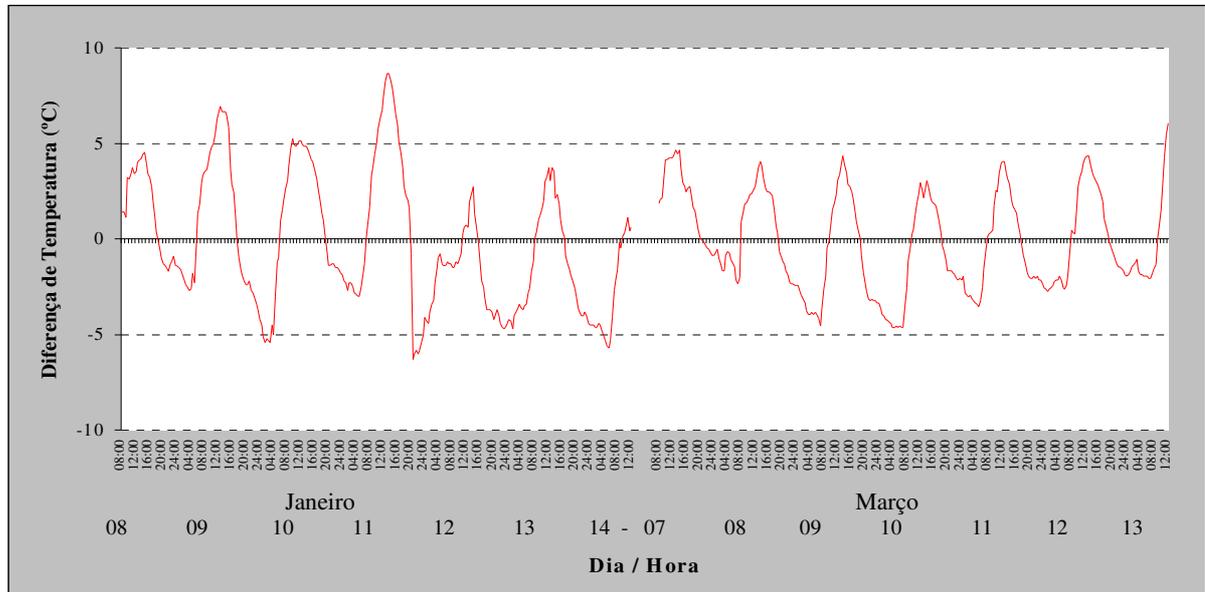


Figura 28 – Gráfico das diferenças de temperaturas do ar externo e interno da cobertura com vegetação, nas semanas selecionadas de verão

4.1.2.1. Umidade do solo

Os dados referentes ao teor de água no solo foram determinados de forma indireta, a partir dos valores do potencial mátrico do solo, esses obtidos por leituras diretas do tensiômetro.

Para determinar a relação entre as variáveis - potencial mátrico (ψ_m) e umidade do solo à base de volume (θ) - foi ajustada uma curva aos vários pontos, cuja relação era conhecida, pois a umidade do solo à base de volume (θ) foi estabelecida a partir da umidade gravimétrica, determinada em laboratório através de amostras retiradas do solo e o valor do potencial mátrico correspondente foi lido no tensiômetro, no momento da respectiva coleta.

O solo empregado no experimento apresentou densidade de 1490 Kg/m³. A densidade e a umidade gravimétrica foram determinadas conforme os métodos descritos no item 3.4.3.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

O gráfico da figura 29 apresenta a curva ajustada aos pontos conhecidos e sua respectiva equação. Esta é a denominada curva característica da água no solo ou curva de retenção de água, a qual relaciona a umidade e o potencial mátrico do solo e é válida apenas no intervalo em que ocorreram as medições, não podendo ser confundida com a curva completa.

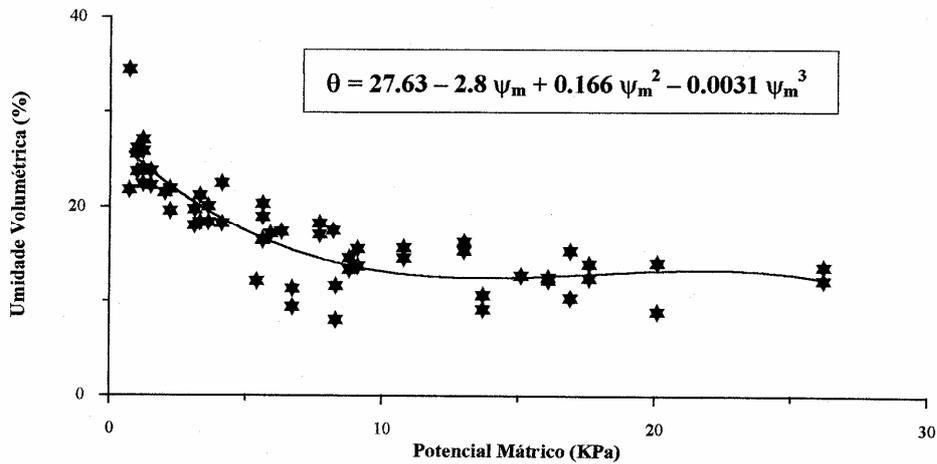


Figura 29 – Curva de ajuste aos pontos conhecidos (potencial mátrico x umidade) e sua respectiva equação

Com a equação da curva acima foi possível estimar a umidade do solo para todos os valores lidos diariamente no tensiômetro e montar o gráfico da figura 30, onde estão registrados o potencial mátrico e a umidade do solo ao longo das semanas analisadas, no período de verão.

O teor de água do solo é fator importante na determinação de suas propriedades térmicas. O calor específico do solo é determinado em função de sua umidade: quanto mais úmido, maior será o calor específico deste solo. Outra propriedade influenciada diretamente pelo teor de água é a condutividade térmica do solo, que será maior à medida que aumentar a umidade, até o momento em que exista quantidade suficiente de água para unir a maioria das partículas do solo. A partir de então, adições posteriores de água terão efeito diminuto na sua condutividade. A umidade do solo ainda desempenha papel muito importante na determinação da quantidade de calor utilizado no processo de evaporação da água nele existente. Isto resulta num processo de resfriamento, especialmente na superfície, onde há maior ocorrência de evaporação, embora apenas parte do calor de vaporização provenha do próprio solo. Assim, a baixa temperatura do solo úmido é resultante, em parte, da evaporação e noutra, do seu elevado calor específico.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

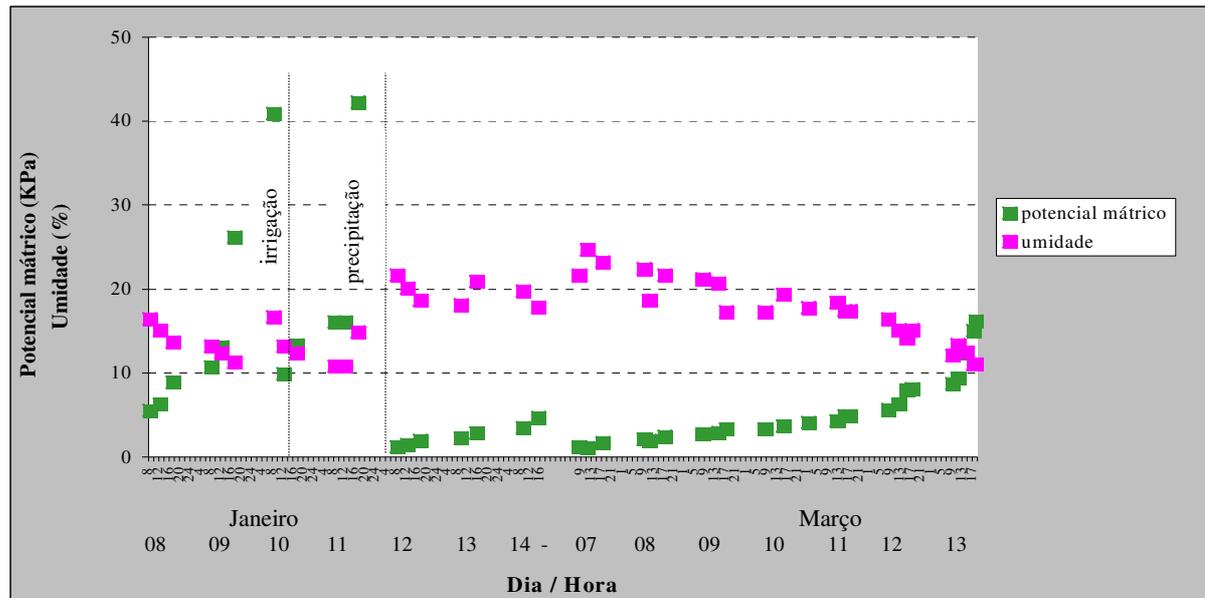


Figura 30 – Gráfico dos dados do potencial mátrico e respectiva umidade volumétrica do solo empregado na cobertura verde, nos períodos de verão

O montante de calor absorvido pelo solo é basicamente determinado pela quantidade de radiação solar que atinge a superfície terrestre. A radiação solar em uma localidade específica depende principalmente do clima e da latitude; porém a quantidade de energia que penetra no solo depende também de outros fatores: cor, declividade, cobertura vegetal da área considerada e vento. A transferência de calor no solo é um processo bastante complexo, no qual o papel do seu teor de água é muito importante pois influi de várias maneiras.

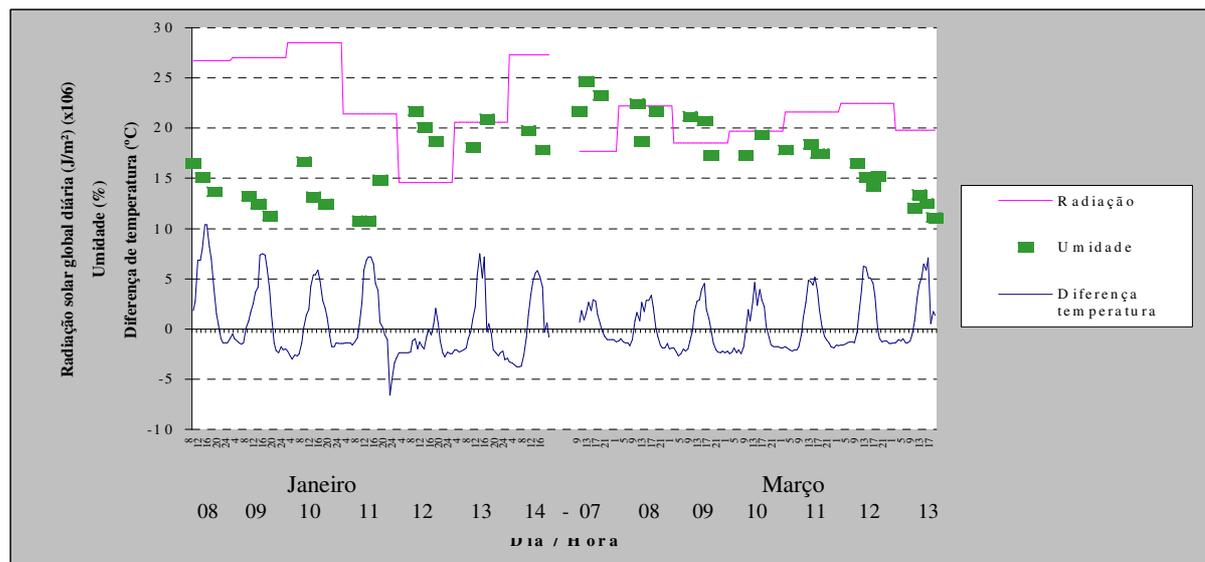


Figura 31 - Dados de radiação solar global diária, umidade do solo e diferença de temperaturas nas superfícies da camada de solo, nos períodos de verão

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Na busca de relacionar umidade do solo com o fluxo de calor através da camada deste mesmo solo, foi montado a figura 31. O gráfico mostra a evolução da diferença entre as temperaturas nas partes superior e inferior da camada de solo, sua umidade e a radiação solar global diária, nas semanas analisadas no verão.

COMENTÁRIOS

Nota-se na figura 31, que devido a intensa chuva (35 mm) ocorrida entre os dias 11 e 12 de janeiro, a umidade do solo atingiu o seu ponto mais elevado, enquanto as diferenças de temperaturas nas superfícies opostas da camada de solo tornaram-se negativas durante o dia, indicando que a temperatura superficial externa sofreu uma grande diminuição e numa velocidade maior que a interna, isto também devido à baixa radiação solar incidente neste dia. Percebe-se, em março, que há uma tendência, ao longo da semana, de aumentar as diferenças de temperaturas durante o dia, enquanto a umidade do solo decresce. Isto, porém, não chega a ser observado em janeiro, já que este período foi muito instável.

4.1.3. Dados da Cobertura com Terraço

4.1.3.1. Temperaturas superficiais

A fim de caracterizar o comportamento térmico da cobertura com terraço, foi traçado o gráfico da figura 32, em que podem ser observados os dados obtidos referentes às temperaturas superficiais nas várias camadas monitoradas desta cobertura, durante as semanas consideradas. Assim como na cobertura com vegetação, o gráfico mostra os dados registrados no ponto central da laje.

De forma resumida, as tabelas 11 e 12 apresentam os valores máximos e mínimos das temperaturas superficiais em cada camada monitorada da cobertura com terraço, além dos horários de ocorrência e da diferença entre elas. Os dados destas tabelas possibilitam analisar o amortecimento térmico verificado entre as camadas, bem como o respectivo retardo térmico.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

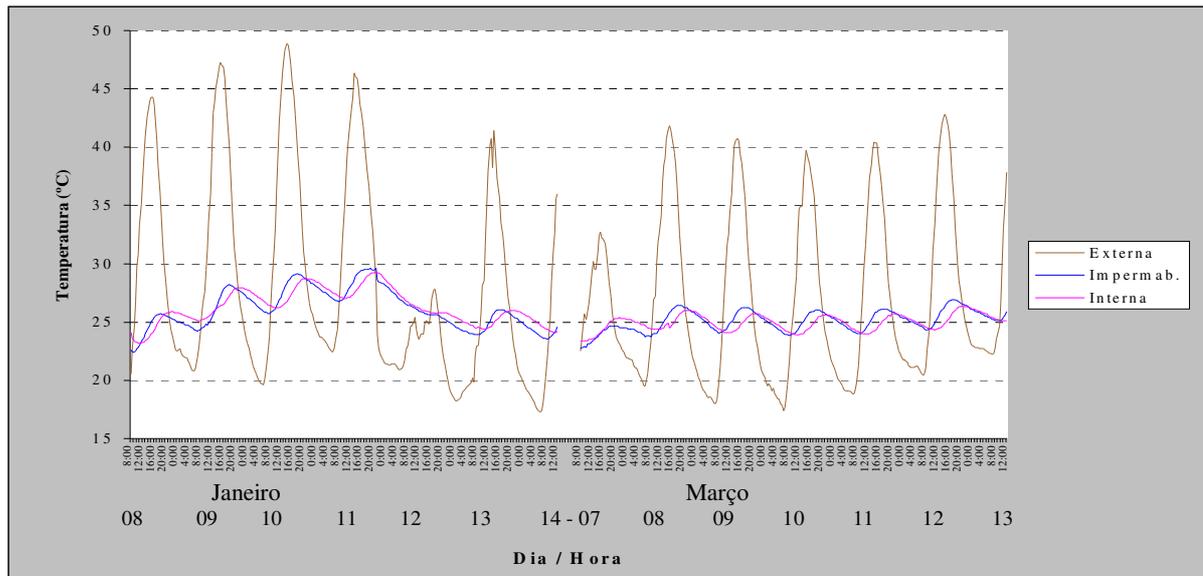


Figura 32 – Gráfico das temperaturas superficiais nas camadas monitoradas da cobertura com terraço, nas semanas selecionadas de verão

COMENTÁRIOS

O gráfico da figura 32 mostra que, nos períodos analisados, a temperatura superficial externa no terraço, assim como na vegetação, também é a que sofre maiores variações diárias. Em janeiro, os gradientes diários oscilaram entre 29,3 °C, ocorrido, em 8 horas, no dia 10/01 e 6,9 °C, ocorrido no dia 12, em 12,5 horas. Esta grande diferença é devida à baixa radiação solar do dia 12, que chegou a somente $14,61 \times 10^6 \text{ J/m}^2$. Em março, durante a semana em estudo, a radiação solar teve pequenas variações entre um dia e outro; por isso, a curva de temperatura superficial externa repetiu-se a cada dia e o gradiente diário manteve-se constante, em torno de 20 °C, variando de 13,2 °C a 23,8 °C.

Durante a semana do mês de janeiro, a temperatura superficial externa máxima foi de 48,9 °C no dia 10 e a mínima, de 17,3 °C no dia 14, gerando um gradiente semanal de 31,6 °C. Em março, o valor máximo foi de 42,9 °C e o mínimo de 17,4 °C, que ocorreram, respectivamente, nos dias 12 e 10, estabelecendo uma diferença semanal de 25,5 °C.

As maiores variações diárias apresentadas pela temperatura superficial externa foram 29,3 °C, no dia 10/01 e 23,8 °C, entre os dias 8 e 9/03. Tais variações ocorreram, respectivamente, em 8 horas e 15,5 horas.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Tabela 11 - Temperaturas superficiais máximas e mínimas nas camadas constituintes da cobertura com terraço Semana de 08 a 14 de janeiro/96

Dia e Hora	Dia 08/01				Dia 09/01				Dia 10/01				Dia 11/01					
	Temperaturas Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)					
Nível	15:00	18:00	22:00	5:30	7:00	7:30	15:00	18:00	20:30	6:00	7:30	9:30	14:00	17:30	19:30	6:00	8:00	10:00
Externo	44.3			20.8			47.3			19.6			48.9			22.4		
Imperm.		25.7 (18.6)			24.2 (-3.4)			28.2 (19.1)						29.1 (19.8)				
Interna			25.9(-0.2)			25.1 (-0.9)		27.9(0.3)					26.2 (-0.5)		28.7(0.4)			27.0 (-0.3)

continua...

Continuação

Dia e Hora	Dia 11/01			Dia 12/01			Dia 13/01				Dia 14/01			
	Temperaturas Máximas (°C)			Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)			Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)			
Nível	13:30	19:00	21:00	5:00	17:30	1:00	7:00	10:00	14:00	15:00	19:30	6:00	8:30	10:30
Externo	46.4			20.9	27.8	18.2			41.4			17.3		
Imperm.		29.6 (16.8)					↓			26.0 (15.4)				23.5 (-6.2)
Interna			29.3(0.3)				↓				26.0 (-)			24.1 (-0.6)

Tabela 12 - Temperaturas superficiais máximas e mínimas nas camadas constituintes da cobertura com terraço

Semana de 07 a 13 de março/96

Dia e Hora	Dia 07/03				Dia 08/03				Dia 09/03				Dia 10/03					
	Temperaturas Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)					
Nível	15:00	18:00	21:30	6:00	8:30	9:00	15:00	17:30	20:00	6:30	8:00	10:00	14:30	16:00	19:30	6:30	7:00	10:30
Externo	32.7			19.5			41.8			18.0			40.7					17.4
Imperm.	24.6 (8.1)			23.7 (-4.2)			26.4 (15.4)			24.0 (-6.0)			26.2 (14.5)					23.9 (-6.5)
Interna	25.4(-0.8)			24.4 (-0.7)			26.0(0.4)			24.1 (-0.1)			25.7(0.5)					23.9 (-)

continua...

Continuação

Dia e Hora	Dia 10/03				Dia 11/03				Dia 12/03				Dia 13/03					
	Temperaturas Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)					
Nível	14:30	17:30	20:00	6:30	8:00	10:00	14:00	16:30	20:00	2:30	8:00	11:00	14:30	17:00	20:30	7:00	8:00	9:30
Externo	39.7			18.8			40.4			21.1			42.9					22.2
Imperm.	26.0 (13.7)			24.0 (-5.2)			26.1 (14.3)			24.3 (-3.2)			26.9 (16.0)					25.1 (-2.9)
Interna	25.6(0.4)			24.0 (-)			25.7(0.4)			24.3 (-)			26.4(0.5)					25.1 (-)

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

A curva que descreve a evolução da temperatura superficial externa é semelhante àquela registrada na cobertura com vegetação. Essa também repete-se a cada dia, com exceção do dia 12/01, em que se descaracteriza, devido à presença de chuva e à baixa radiação solar. A curva apresenta três trechos diários distintos: um, acentuadamente crescente, a partir das 6 horas da manhã, até atingir um valor máximo, em torno das 14 horas; a partir de então, outro, acentuadamente decrescente, até mais ou menos as 21 horas; o terceiro, também decrescente, porém menos acentuado, na madrugada, até atingir um valor mínimo, em torno de 6 horas.

Quanto à temperatura na camada de proteção mecânica da impermeabilização, os valores máximos atingidos foram: 29,6 °C, em 11 de janeiro; 26,9 °C, em 12 de março e os mínimos, 23,5 e 23,7 °C, respectivamente, em 14/01 e 08/03. Em janeiro, a maior variação diária registrada foi 4,0 °C, no dia 9, levando 11 horas entre a ocorrência dos valores máximo e mínimo. Em março, as variações diárias foram menores, atingindo uma diferença máxima de 2,7 °C, em 9 horas, no dia 08.

Assim como na cobertura com vegetação, a temperatura superficial interna foi a que sofreu menores oscilações diárias. Estas variações oscilaram, em janeiro, de 0,8 °C (entre os dias 8 e 9/01) a 2,8 °C (no dia 9/01). Em março, as variações, assim como as ocorridas na cobertura com vegetação, também foram menores, variando de 1,0 a 1,9 °C. Valores extremos desta temperatura, durante cada semana analisada: 29,3 °C e 24,1 °C, em janeiro, e 26,4 °C e 23,9 °C, em março.

Os dados da tabela 11 mostram que, em janeiro, os valores extremos da temperatura superficial externa fizeram-se sentir no nível da impermeabilização, com retardo térmico que variou de 1,0 a 6,0 horas e com diferenças de temperaturas, de 3,4 a 19,8 °C. Já os valores extremos da camada da impermeabilização se refletiram na superfície interna com diferenças de temperaturas de até 0,9 °C, e com retardo térmico, entre 0,5 e 4,5 horas. Assim, os extremos registrados na superfície externa levaram de 2,0 a 9,0 horas para se manifestarem na superfície interna e com diferença de temperatura entre 4,3 e 20,2 °C.

Já em março, de acordo com a tabela 12, os valores extremos de temperaturas, medidos na superfície externa, foram sentidos na superfície interna com amortecimento térmico que variou entre 2,9 e 16,5 °C e com retardo térmico de 2,5 a 8,5 horas. Estes mesmos valores manifestaram-se na superfície da impermeabilização com amortecimento e

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

retardo térmicos de: 2,9 a 16,0 °C e de 0,5 a 5,5 horas, respectivamente. Na camada entre as superfícies da impermeabilização e interna, as diferenças de temperaturas foram bem menores, isto é, entre 0,0 e 0,8 °C e com retardo de 0,5 a 3,5 horas.

A figura 33, abaixo, mostra as curvas de diferenças entre as temperaturas superficiais nas três camadas monitoradas da cobertura com terraço, nas semanas analisadas, de janeiro e março. Observa-se, no gráfico, que estas curvas descrevem, também, um comportamento esperado, isto é: considerando camadas consecutivas, a curva representativa das diferenças entre as temperaturas superficial externa e na camada de proteção mecânica da impermeabilização sofreu maiores variações, com diferenças mais significativas no período em que houve insolação. Em janeiro, tais diferenças chegaram a atingir 20,5 °C e, em março, 16,5 °C. As diferenças tornaram-se menores entre as temperaturas na camada de proteção mecânica da impermeabilização e a superficial interna, registrando valor máximo de 1,6 °C em janeiro e, 1,5 °C, em março. As curvas indicam que, nas duas camadas, houve, ao longo do dia, uma inversão no sentido do fluxo de calor, com exceção do dia 12/01. Considerando a cobertura em toda a sua espessura, a diferença entre as temperaturas externa e interna chegou à 22,1 °C.

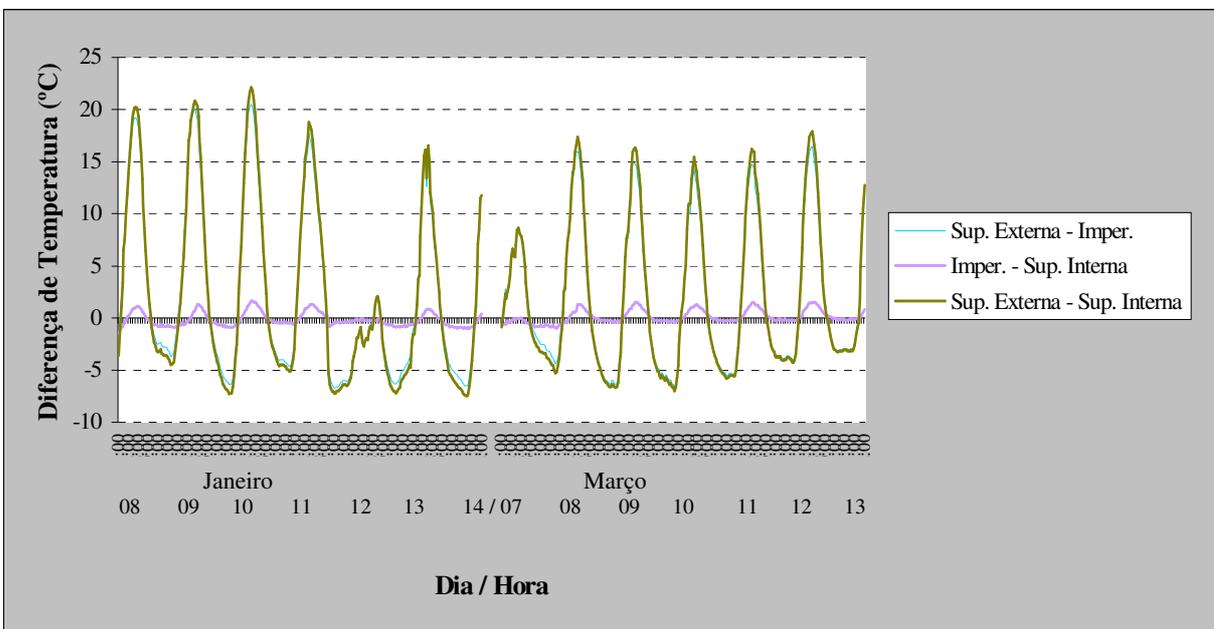


Figura 33 – Gráfico das diferenças de temperaturas superficiais, nas camadas constituintes da cobertura com terraço, nas semanas selecionadas de verão

4.1.3.1. Temperaturas do ar interno e de globo

Os dados obtidos, relativos às temperaturas do ar externo e interno e à de globo, em período de verão, na câmara sob a cobertura com terraço, durante as duas semanas analisadas, podem ser observados no gráfico das figura 34. As tabelas 13 e 14, abaixo, complementam as informações dos gráficos anteriores, apresentando os valores máximos e mínimos das temperaturas do ar externo e interno, além dos horários de ocorrência dos mesmos, bem como a diferença entre elas.

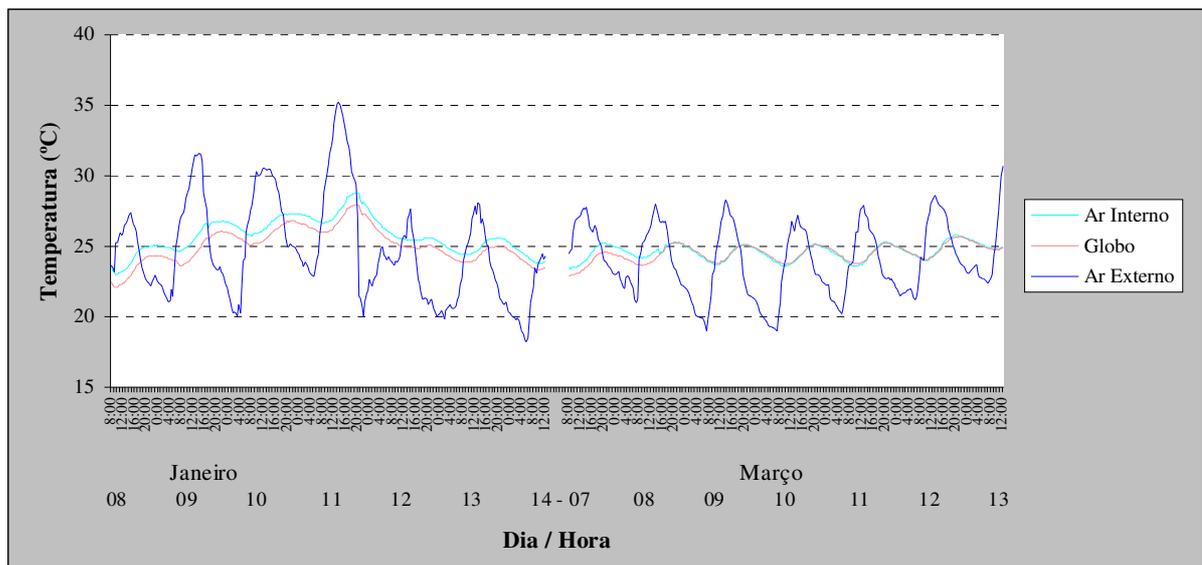


Figura 34 – Gráfico de temperaturas do ar externo e interno e temperatura de globo, na cobertura com terraço, nas semanas selecionadas de verão

COMENTÁRIOS

Os dados de temperatura do ar interno e de globo, mostrados na figura 34, indicam, de forma qualitativa, que a diferença entre eles foi significativa somente em janeiro. Em março, nota-se que, no primeiro dia, foi registrada uma diferença semelhante aquela verificada em janeiro, porém, a partir de determinado momento, ela deixa de existir. A falta de dados complementares dificulta o entendimento do comportamento diferenciado entre os dois períodos. Nesta semana, a temperatura do ar foi sempre superior à de globo, mantendo uma diferença mais ou menos constante, em torno de $0,8\text{ }^{\circ}\text{C}$, indicando haver efeito de radiação no ambiente. Como, a maior parte do tempo, a temperatura superficial interna da laje foi superior à do ar (com diferenças variando de $-0,3$ a $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$), deve ter havido influência das temperaturas das outras superfícies (piso e paredes) não monitoradas.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Tabela 13 – Valores máximos e mínimos das temperaturas do ar externo e interno na cobertura com terraço – Semana em janeiro / 96

Dia e Hora	Dia 08/01	Dia 09/01				Dia 10/01				Dia 11/01
	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)
Variável	14:30 22:30	3:30 7:00	14:00 22:00		3:00 8:00	12:00 20:30			5:00 8:00	
Ar Externo	27.4	31.6				30.6				22.8
Ar Interno - CT -	25.1 (2.3)	21.0		26.8 (4.8)		25.7 (-5.7)		27.3 (3.3)		26.6 (-3.8)

continua...

continuação

Dia e Hora	Dia 11/01	Dia 11 e 12/03		Dia 13/01		Dia 14/01
	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)		Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)		Temperaturas Mínimas (°C)
Variável	13:30 18:30	22:00	14:00	1:30 7:00	13:00 20:00	5:30 10:30
Ar Externo	35.2	27.8		28.2		18.2
Ar Interno - CT -	28.7 (6.5)	↓	↓	24.4 (-4.6)		25.6 (2.6)
						23.8 (-5.6)

Tabela 14 - Valores máximos e mínimos das temperaturas do ar externo e interno na cobertura com terraço - Semana em março / 96

Dia e Hora	Dia 07/03	Dia 08/03				Dia 09/03				Dia 10/03
	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)
Variável	14:00 19:00	7:00 9:00	13:30 20:00		7:00 9:30	13:30 19:00			7:00 8:30	
Ar Externo	27.8	28.0				28.4				19.0
Ar Interno - CT -	25.2 (2.6)	21.0		25.3 (2.7)		23.7 (-4.7)		25.1 (3.3)		23.6 (-4.6)

continua...

continuação

Dia e Hora	Dia 10/03	Dia 11/03				Dia 12/03				Dia 13/03
	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)
Variável	14:00 19:00	5:00 8:30	12:30 19:30		6:00 9:00	13:00 19:30			7:00 8:00	
Ar Externo	27.2	28.0				28.6				22.4
Ar Interno - CT -	25.1 (2.1)	23.6 (-3.4)		25.3 (2.7)		24.0 (-2.8)		25.8 (2.8)		24.8 (-2.4)

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

No gráfico, pode-se observar que a evolução da temperatura do ar interno tem comportamento semelhante ao do ar externo, porém com oscilações diárias bem menores e com ocorrência de retardo térmico.

Pode-se observar, no gráfico e na tabela 13, que a temperatura do ar interno atingiu, durante esta semana de janeiro, um valor máximo de 28,7 °C, no dia 11, quando a temperatura do ar externo também alcançou o máximo (35,2 °C). Internamente, o menor valor registrado foi 23,8 °C, ocorrido no dia 14. As oscilações diárias da temperatura do ar interno variaram de 0,5 °C a 2,2 °C. É interessante observar que a temperatura do ar interno esteve constantemente em declínio a partir das 18:30 horas do dia 11 até as 7:00 do dia 13, quando atingiu um valor mínimo. Isto provavelmente aconteceu em função da queda brusca da temperatura externa (15,2 °C em 8,5 horas) ocorrida no dia 11, associada à baixa incidência de radiação solar do dia seguinte, de tal forma que o comportamento interno da temperatura não correspondeu à oscilação externa registrada no dia 12.

Na semana de março, a temperatura do ar interno atingiu o valor máximo (25,8 °C) no dia 12, enquanto o mínimo (23,6 °C) foi registrado nos dias 10 e 11, conforme pode ser verificado no gráfico e na tabela 14. O valor mais elevado da temperatura interna ocorreu no dia de temperatura externa máxima. Internamente, a temperatura do ar sofreu variações diárias que oscilaram entre 1,0 °C e 1,8 °C, enquanto, externamente, a oscilação ficou entre 6,2 °C e 9,4 °C.

Conforme ainda pode ser observado nas tabelas anteriores, os valores extremos da temperatura do ar externo manifestaram-se, internamente, com amortecimento que variou de 2,3 °C a 6,5 °C, em janeiro e, de 2,1 °C a 4,7 °C, em março, com retardo térmico de 3 a 8,5 horas e de 1 a 6,5 horas, respectivamente.

Durante os períodos analisados no verão, a temperatura média do ar interno da câmara sob a cobertura com terraço manteve-se superior à do ar externo. Em janeiro, internamente, foi registrada temperatura média de 25,7 °C e externamente, de 24,8 °C. Em março estes valores foram, respectivamente, 24,6 °C e 24,2 °C.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

A figura 35, a seguir, apresenta as curvas do comportamento das diferenças entre as temperaturas do ar externo e interno, para cada semana analisada. O gráfico indica que, durante o dia, a temperatura do ar externo é mais elevada do que a do ar interno e, nas madrugadas, ocorre o inverso.

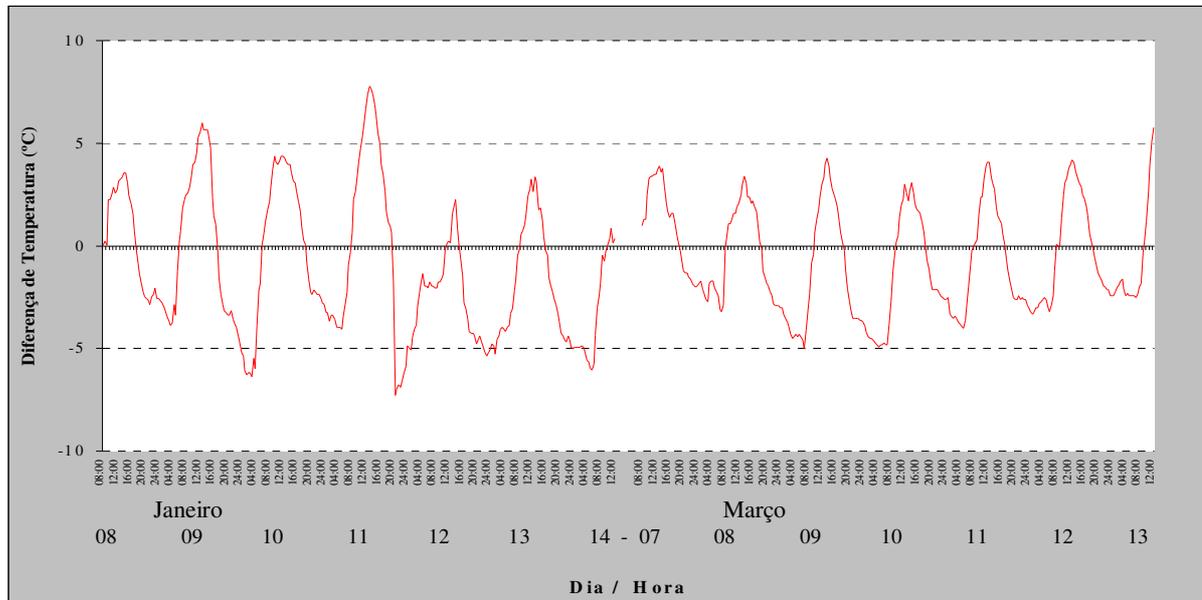


Figura 35 – Gráfico das diferenças de temperaturas do ar externo e interno da cobertura com terraço, nas semanas selecionadas de verão

4.1.4. Análise Estatística dos Dados

De posse dos dados de verão, a análise estatística foi realizada conforme previsto no item 3.3.2, sendo descritos abaixo os resultados obtidos.

- a) Temperaturas superficiais (externa, interna e na camada de proteção mecânica da impermeabilização)

Para analisar essas variáveis, foram realizadas duas análises de variância para cada temperatura superficial (externa, interna e sobre a camada de proteção mecânica da impermeabilização), correspondentes aos horários de temperatura máxima (14 horas) e mínima (6 horas) do ar externo, em cada semana estudada. O projeto adotado considerou os seguintes fatores: dia (A), tipo de cobertura (B – vegetação / terraço) e posição do sensor (C – central / lateral). Os resultados permitem afirmar, resumidamente, o que segue:

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

- fator A (dia):
 - significativo em todas as análises realizadas, ou seja, as temperaturas registradas diferem de dia para dia.
 - fator B (tipo de cobertura):
 - significativo em todas as análises feitas, isto é, quanto às temperaturas superficiais, nos três níveis monitorados, as coberturas com vegetação e terraço diferem entre si.
 - fator C (posição do sensor):
 - não significativo em todas as análises realizadas. Assim, para os três níveis considerados, as diferenças das medidas de temperaturas obtidas nas posições central e lateral de cada cobertura, não possuem maior significação.
 - interação entre os fatores B e C:
 - não significativo em todas as análises realizadas com dados de temperaturas superficiais interna e na camada de proteção mecânica da impermeabilização; na maioria das análises feitas para a temperatura superficial externa.
 - pouco significativo na minoria das análises realizadas para a temperatura superficial externa.
- b) Temperatura do ar interno e temperatura de globo

Para analisar essas variáveis foram feitas duas análises de variância, correspondentes aos horários de temperatura máxima (19 horas) e mínima (9 horas) do ar interno, em cada semana selecionada. O projeto estatístico adotado considerou os seguintes fatores: dia (A), tipo de cobertura (B – vegetação / terraço) e medida interna (C – temperatura do ar interno / temperatura de globo). Os resultados obtidos são:

- fator A (dia):
 - significativo em todas as análises realizadas, ou seja, as temperaturas registradas diferem dia a dia.
- fator B (tipo de cobertura):
 - significativo em todas as análises feitas, isto é, quanto às medidas internas (temperaturas do ar e de globo), as coberturas verde e com terraço diferem entre si.
- fator C (medidas internas):
 - significativo em todas as análises realizadas, ou seja, as medidas internas diferem de uma cobertura para outra; porém, quando as medidas internas de uma mesma cobertura são comparadas entre si, por uma comparação múltipla de médias, os

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

resultados indicam que: na cobertura com vegetação, não existe diferença significativa entre as temperaturas do ar interno e a de globo e que, na cobertura com terraço, a diferença entre estas variáveis é significativa no mês de janeiro e não o é, em março.

- Interação entre os fatores B e C:
 - significativo em todas as análises realizadas.

DISCUSSÃO:

Discutindo os resultados anteriores, pode-se afirmar que:

- as coberturas com vegetação e terraço apresentam comportamento diferente entre si, em relação às temperaturas superficiais obtidas em condições climáticas de verão;
- a hipótese de fluxo de calor unidimensional está, estatisticamente, confirmada para situação de verão, pois todas as análises mostraram as temperaturas superficiais medidas nas posições central e lateral, na cobertura com terraço ou com vegetação, não diferindo significativamente entre si. Logo, todos os dados de temperaturas superficiais apresentados são referentes ao ponto central da laje;
- as coberturas com vegetação e terraço, também apresentam comportamento diferente entre si, quando consideradas as medidas internas (temperatura do ar interno e de globo) registradas nas câmaras sob cada cobertura;
- na cobertura com vegetação, o efeito interno de radiação é muito pequeno, pois não é significativa a diferença entre as temperaturas do ar e de globo. Os dados mostram que a temperatura do ar ora é levemente superior à de globo, ora é inferior e muitas vezes igual. Isto indica que há uma tendência ao equilíbrio;
- na cobertura com terraço, em janeiro, a diferença entre as temperaturas do ar e a de globo é significativa, e a primeira é sempre superior logo, pode-se afirmar que a temperatura média radiante das superfícies circundantes era inferior a do ar. Em março, a avaliação fica prejudicada devido ao comportamento verificado na evolução destas variáveis.

4.1.5. Análise Comparativa entre as Coberturas

4.1.5.1. Temperaturas superficiais

a) Temperatura superficial externa

Com a finalidade de comparar o comportamento térmico das duas coberturas, em relação às temperaturas superficiais, foram elaborados o gráfico e tabelas apresentados a seguir. A figura 36 mostra a evolução das temperaturas superficiais externas de ambas as coberturas, confrontadas com a temperatura do ar externo e com a radiação solar global, nas semanas selecionadas de verão. As tabelas 15 e 16 complementam a figura, apresentando os valores extremos de cada variável e o respectivo horário de ocorrência, bem como a diferença entre as temperaturas superficiais das coberturas.

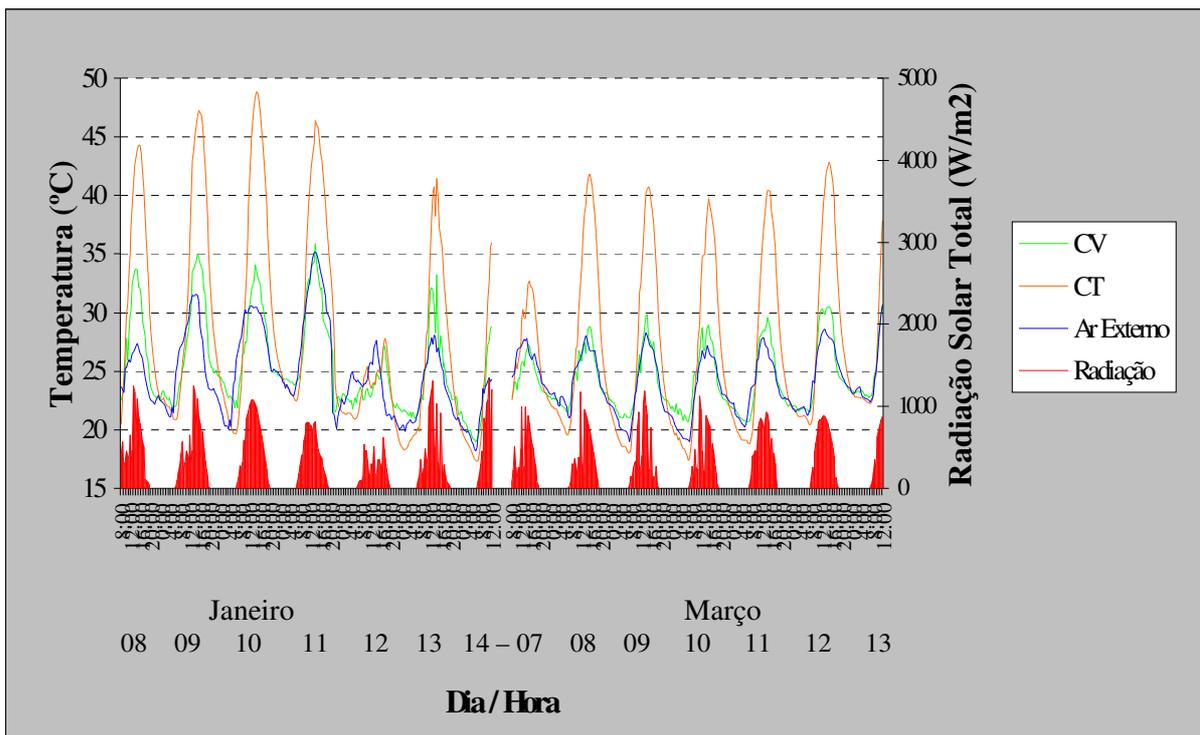


Figura 36 - Gráfico das temperaturas superficiais externas das duas coberturas, confrontadas com a temperatura do ar externo e com a radiação solar total, nas semanas selecionadas de verão

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Tabela 15 - Valores máximos e mínimos da temperatura do ar externo e temperaturas superficiais externas de ambas as coberturas, bem como horário de ocorrência dos mesmos e radiação solar global diária - Semana em janeiro / 96

Dia e Hora	Dia 08/01				Dia 09/01				Dia 10/01				Dia 11/01			
	Temperaturas Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)			
Variável	14:30	15:00	3:30	5:00	5:30	14:00	14:30	15:00	3:00	5:30	6:00	12:00	13:30	14:00	5:00	6:00
Ar Externo	27.4		21.0		31.6				20.0		30.6				22.8	
Temp. Sup. Ext. - CV -	33.8 (10.5)		22.0		35.1 (12.2)				21.9		34.1 (14.8)				23.8	
Temp. Sup. Ext. - CT -	44.3				20.8 (-1.2)			47.3		19.6 (-2.3)				48.9		22.4 (-1.4)
Radiação solar global diária (J/m ²)	26.66 x 10 ⁶				26.96 x 10 ⁶				28.46 x 10 ⁶							

continua...

Continuação

Dia e Hora	Dia 11/01				Dia 12/01				Dia 13/01				Dia 14/01			
	Temperaturas Máximas e Mínimas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)			
Variável	13:30	21:00	22:00	5:00	5:00	14:00	17:00	17:30	1:00	1:30	5:30	12:00	13:00	14:00	5:30	6:00
Ar Externo	35.2		20.0		27.8				19.8		28.2				18.2	
Temp. Sup. Ext. - CV -	35.9 (10.5)		21.5		27.1 (0.7)				21.0		32.1 (9.0)				19.0	
Temp. Sup. Ext. - CT -	46.4				20.9 (-0.6)			27.8		18.2 (-2.8)				41.4		17.3 (-1.7)
Radiação solar global diária (J/m ²)	21.35 x 10 ⁶				14.61 x 10 ⁶				20.60 x 10 ⁶				27.29 x 10 ⁶			

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Tabela 16 - Valores máximos e mínimos da temperatura do ar externo e temperaturas superficiais externas de ambas as coberturas, bem como horário de ocorrência dos mesmos e radiação solar global diária - Semana em março / 96

Dia e Hora	Dia 07/03			Dia 08/03			Dia 09/03			Dia 10/03					
	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas (°C)	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas (°C)	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas (°C)	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas (°C)	Temperaturas Máximas (°C)			
Variável	14:00	14:30	15:00	6:00	7:00	13:30	15:00	6:30	7:00	13:30	14:00	14:30	6:00	6:30	7:00
Ar Externo	27.8			21.0	28.0	28.4	19.0	28.4	19.8						
Temp. Sup. Ext. - CV -	27.3 (5.4)			21.5	28.8 (13.0)	29.8 (10.9)	21.0	20.7	20.7						
Temp. Sup. Ext. - CT -	32.7			19.5 (-2.0)	41.8	40.7 (-3.3)	18.0	17.4	17.4						
Radiação solar global diária (J/m ²)						17.68 x 10 ⁶									18.54 x 10 ⁶

continua...

Continuação															
Dia e Hora	Dia 10/03			Dia 11/03			Dia 12/03			Dia 13/03					
	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas (°C)	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas (°C)	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas (°C)	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas (°C)	Temperaturas Máximas (°C)			
Variável	14:00	14:30		5:00	6:00	6:30	12:30	14:00	6:00	6:30	7:00	13:00	14:30	6:30	7:00
Ar Externo	27.2			20.2	28.0	28.6	21.2	22.4	21.2	28.6	22.4				
Temp. Sup. Ext. - CV -	28.9 (10.8)			20.7	29.6 (10.8)	30.5 (12.4)	21.5	22.7	21.5	22.7	22.7				
Temp. Sup. Ext. - CT -	39.7			18.8 (-1.9)	40.4	42.9 (-0.5)	20.4	22.2	20.4	22.2	22.2				
Radiação solar global diária (J/m ²)						19.71 x 10 ⁶									19.83 x 10 ⁶

COMENTÁRIOS

Nota-se, no gráfico, que as curvas representativas das temperaturas superficiais externas de ambas as coberturas, confirmam, de forma qualitativa, a significância das diferenças entre elas, apontada na análise de estatística. Tais diferenças chegaram a 15,7 °C, em janeiro e a 13,0 °C, em março.

Figura e tabelas mostram que a cobertura com terraço apresenta temperatura superficial externa com valores extremos absolutos maiores que da vegetação, além de experimentar amplitudes mais elevadas; portanto, o terraço, externamente, aquece e resfria mais que a cobertura com vegetação.

Na semana analisada em janeiro, o valor máximo desta temperatura, na cobertura com terraço, atingiu 48,9 °C, no mesmo dia em que a radiação solar global diária também foi máxima, igual a $28,46 \times 10^6 \text{ J/m}^2$. Já na cobertura com vegetação, o valor máximo, 35,9 °C, foi atingido no dia seguinte, quando a temperatura do ar também atingiu o máximo, isto é, 35,2 °C, associada a uma radiação solar global diária de $21,35 \times 10^6 \text{ J/m}^2$. Quanto aos valores mínimos desta temperatura, as duas coberturas atingiram este extremo, durante tal semana, na madrugada do dia 14, registrando-se, 17,3 °C, no terraço, e 19,0 °C, na vegetação, enquanto a temperatura mínima do ar externo era 18,2 °C.

Os dados de amplitude diária reforçam e complementam o acima exposto: o terraço esteve sujeito às maiores variações, de 6,9 a 29,3 °C, enquanto a vegetação, de 5,6 a 11,1 °C, quando, externamente, a temperatura do ar apresentou amplitudes de 6,4 a 15,2 °C. Em termos de média da temperatura superficial externa, o terraço é a cobertura que apresenta o valor mais elevado, 26,2 °C. A vegetação registrou um valor médio de 25,0 °C, enquanto o ar externo, 24,8 °C.

Na semana analisada em março, as temperaturas superficiais externas máximas, em ambas as coberturas, ocorreram no dia 12: 42,9 °C, no terraço e, 30,5 °C, na vegetação, portanto uma diferença de 12,4 °C. Neste dia, a temperatura máxima do ar externo foi 28,6 °C e a radiação solar global diária, $22,46 \times 10^6 \text{ J/m}^2$, maior valor registrado durante a semana. Os valores mínimos foram, respectivamente, de 17,4 °C e 20,7 °C, ambos ocorridos na madrugada do dia 10, quando a temperatura do ar chegou a 19,0 °C, sendo este o mínimo valor registrado durante o período.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Quanto à amplitude da variação diária da temperatura superficial externa, também nesta semana, foram maiores na cobertura com terraço, onde se registraram oscilações de 13,2 a 23,8 °C, enquanto na cobertura com vegetação variaram em torno de 8,0 °C, e externamente, de 6,0 a 9,4 °C. Como na semana de janeiro, o terraço é a cobertura que apresentou maior média em relação a temperatura superficial externa, 25,0 °C, enquanto a vegetação apresentou valor igual a média do ar externo, 24,2 °C.

Nos dias analisados nas duas semanas de verão, verificou-se que os valores extremos (máximo e mínimo) da temperatura superficial externa em relação aos do ar externo, ocorreram primeiro na cobertura com vegetação ou, ao mesmo tempo, na cobertura com terraço. Quando houve diferença, esta variou de meia a uma hora.

b) Temperatura superficial na impermeabilização

A figura 37 apresenta as curvas de evolução das temperaturas relativas à camada de proteção mecânica da impermeabilização de cada cobertura, nas semanas de janeiro e março.

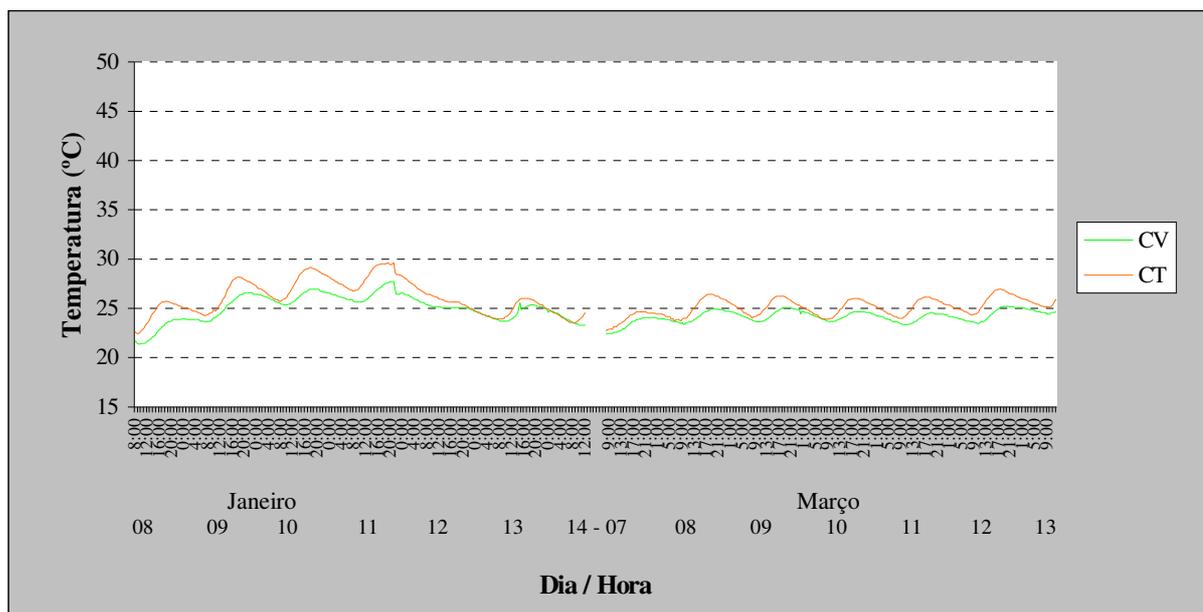


Figura 37 – Gráfico das temperaturas na camada de proteção mecânica da impermeabilização de cada cobertura, nas semanas selecionadas de verão

As tabelas 17 e 18 complementam o gráfico anterior, apresentando os valores extremos desta temperatura em ambas as coberturas, bem como a diferença entre elas e o respectivo horário de ocorrência.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Tabela 17 – Valores máximos e mínimos das temperaturas superficiais na camada de proteção mecânica da impermeabilização, em ambas as coberturas - Período: 08 a 14 de janeiro / 96

Dia e Hora Temp. Imperm.	Dia 08/01	Dia 09/01				Dia 10/01			Dia 11/01
	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas (°C)	Mínimas	e Máximas	Temperaturas Mínimas (°C)	Mínimas	e Máximas	Temperaturas Mínimas (°C)	
	18:00 23:30	7:00	18:00	20:00	7:30 9:00	17:30		8:00 8:30	
CV	23.9	26.5				25.3	26.9	25.6	
CT	25.7 (1.8)	24.2 (0.6)	28.2 (1.7)		25.7 (0.4)	29.1 (2.2)	26.7 (1.1)		

continua...

continuação

Dia e Hora Temp. Imperm.	Dia 11/01	Dia 12/01				Dia 13/01			Dia 14/01
	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas (°C)	Mínimas	e Máximas	Temperaturas Mínimas (°C)	Mínimas	e Máximas	Temperaturas Mínimas (°C)	
	19:00 20:00				7:00 8:00	15:00 18:00		8:30 10:00	
CV	27.7	↓				23.7	25.3	23.3	
CT	29.6 (1.9)	↓	↓		23.9 (0.2)	26.0 (0.7)	23.5 (0.2)		

Tabela 18 – Valores máximos e mínimos das temperaturas superficiais na camada de proteção mecânica da impermeabilização, em ambas as coberturas - Período: 07 a 13 de março / 96

Dia e Hora Temp. Imperm.	Dia 07/03	Dia 08/03				Dia 09/03			Dia 10/03
	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas (°C)	Mínimas	e Máximas	Temperaturas Mínimas (°C)	Mínimas	e Máximas	Temperaturas Mínimas (°C)	
	18:00 20:00	8:30 9:30	17:30	18:30	8:00 9:30	16:00 18:00		7:00 9:30	
CV	24.0	24.9				23.6	25.0	23.6	
CT	24.6 (0.6)	23.3	26.4 (1.5)		24.0 (0.4)	26.2 (1.6)	23.9 (0.3)		

continua...

continuação

Dia e Hora Temp. Imperm.	Dia 10/03	Dia 11/03				Dia 12/03			Dia 13/03
	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas (°C)	Mínimas	e Máximas	Temperaturas Mínimas (°C)	Mínimas	e Máximas	Temperaturas Mínimas (°C)	
	17:30	8:00 9:30	16:30	18:30	8:00 10:00	17:00 19:00		8:00 9:00	
CV	24.6	24.5				23.4	25.2	24.4	
CT	26.0 (1.4)	24.0 (0.7)	26.1 (1.6)		24.3 (0.9)	26.9 (1.7)	25.1 (0.7)		

COMENTÁRIOS

O gráfico da figura 37 confirma, qualitativamente, os resultados das análises de variância realizadas com os dados de temperaturas na camada de proteção mecânica da impermeabilização, isto é, que existe uma diferença significativa entre os valores registrados nas coberturas com terraço e com vegetação.

Em janeiro, conforme pode ser observado na figura 37 e na tabela 17, esta temperatura foi maior na cobertura com terraço, com exceção de um pequeno período nos dias 13 e 14. A diferença, num mesmo instante, entre esta temperatura na CT e na CV variou entre $-0,2$ a $2,6$ °C. As menores diferenças são relativas aos horários de temperaturas mínimas superficiais (madrugada). Já as maiores diferenças estão relacionadas à presença de radiação solar e conseqüente temperaturas superficiais externas elevadas, principalmente no terraço. No intervalo referente ao período de chuva, associado à baixa radiação solar, as diferenças tornam-se nulas ou negativas, ou seja, a temperatura na impermeabilização na CT é igual ou menor que na CV, por haver um resfriamento mais rápido nesta cobertura.

Os dados da tabela 17 mostram que a impermeabilização da cobertura com terraço sofreu maiores oscilações diárias de temperatura. Foram registradas, nesta cobertura, amplitudes de variação diária de temperatura de até $4,0$ °C, enquanto na vegetação, de $0,3$ a $2,9$ °C. No dia 11/01 foram registrados os valores mais elevados desta temperatura, em ambas as coberturas, isto é: $29,6$ °C, no terraço e $27,7$ °C, na vegetação. As temperaturas mínimas ocorreram no dia 14/01: $23,5$ °C, no terraço e $23,3$ °C, na vegetação. Os valores máximos e mínimos foram atingidos primeiro na cobertura com terraço, com exceção de duas vezes (mínimas no dia 09 e máxima no dia 10), em que aconteceram no mesmo horário. A diferença de tempo entre a ocorrência de um valor extremo em uma e outra cobertura chegou a 5,5 horas.

Em março, a temperatura na impermeabilização da cobertura com terraço manteve-se sempre superior ou igual à da vegetação. As diferenças entre as temperaturas de uma e outra cobertura variaram de $0,0$ a $2,1$ °C. O valor máximo desta diferença ocorreu no dia de maior radiação solar desta semana, 12/03, quando a temperatura superficial externa, no terraço, atingiu o máximo.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

A tabela 18 evidencia que a impermeabilização da cobertura com terraço, também em março, sofreu maiores oscilações diárias de temperatura. O terraço registrou amplitudes de variação diária de temperatura de até 2,7 °C, enquanto na vegetação, de 0,7 a 1,6 °C. No dia 12 foram registrados os valores mais elevados desta temperatura, em ambas as coberturas, isto é: 26,9 °C, no terraço e 25,2 °C, na vegetação. As temperaturas mínimas ocorreram no dia 08/03: 23,7 °C, no terraço e 23,3 °C, na vegetação. Assim como em janeiro, os valores máximos e mínimos foram atingidos primeiro na cobertura com terraço, com exceção dos valores máximos do dia 10/03, em que aconteceram no mesmo horário. A diferença de tempo entre a ocorrência de um valor extremo, em uma e outra cobertura, chegou a 2,5 horas.

A grande diferença, registrada entre as temperaturas superficiais externas das coberturas, refletiu-se ao nível da impermeabilização de maneira bastante reduzida, pois, na cobertura com vegetação, o solo e a camada drenante protegeram termicamente a impermeabilização e, no terraço, esta tarefa foi cumprida pelo isolamento térmico e pelo sistema U.S.D. - *up side down* empregados.

c) Temperatura superficial interna

O gráfico da figura 38, a seguir, mostra a evolução das temperaturas superficiais internas em ambas as coberturas, nos períodos de verão, confrontadas com a temperatura do ar externo.

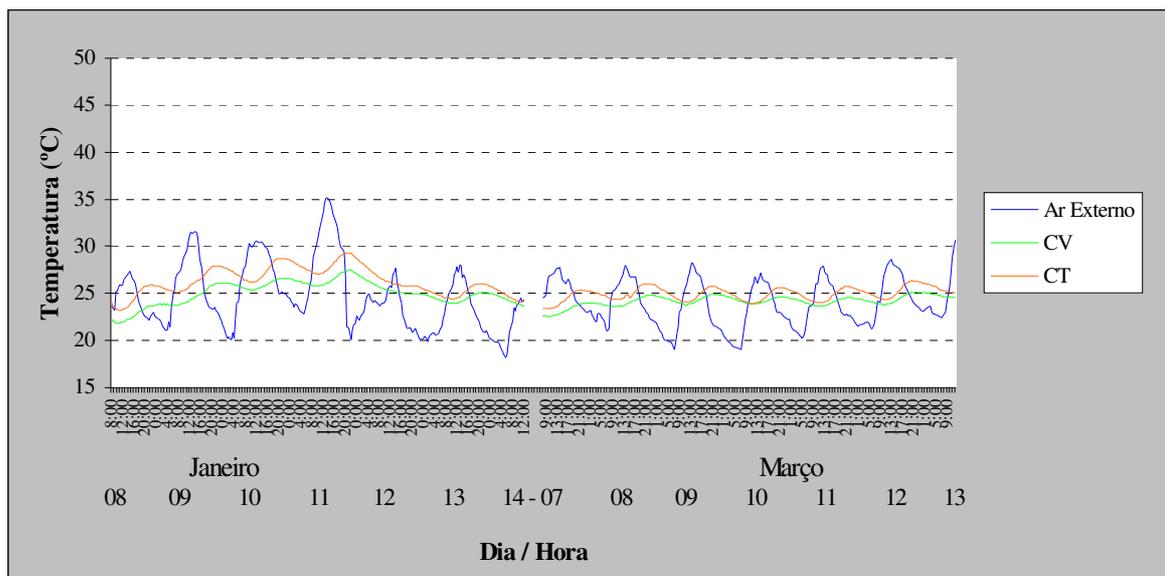


Figura 38 – Gráfico das temperaturas superficiais internas das duas coberturas, confrontadas com a temperatura do ar externo, nas semanas selecionadas de verão

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

As tabelas 19 e 20 apresentam os valores máximos e mínimos das temperaturas do ar externo e superficiais internas das duas coberturas e seus respectivos horários de ocorrência, complementando, assim, o gráfico anterior.

COMENTÁRIOS

Durante as duas semanas analisadas, a temperatura superficial interna na cobertura com terraço manteve-se sempre superior ou igual à da cobertura com vegetação. A diferença entre elas variou, na semana de janeiro, entre 0,3 °C e 2,4 °C e na semana de março, entre 0,0 °C e 1,5 °C. Tal diferença acentuou-se nos dias de maior radiação solar, quando a diferença entre as temperaturas superficiais externas, de uma e outra cobertura, no período de insolação, é maior. Estatisticamente, estas diferenças apresentam-se como significativas.

Os valores máximos atingidos pela temperatura superficial interna, em janeiro, ocorreram, em ambas as coberturas, no dia 11, às 21:00 horas, registrando-se: 29,3 °C, no terraço e 27,5 °C, na vegetação. Entretanto, os valores mínimos ocorreram no dia 14, em horários distintos: 24,1 °C, às 10:30 horas, na CT e 23,7 °C, às 12:00, na CV. Em março, os valores extremos desta temperatura foram 26,4 °C e 23,9 °C, na cobertura com terraço e, 25,2 °C e 23,6 °C, na cobertura com vegetação.

No nível da superfície interna, também é o terraço que sofre maiores oscilações diárias de temperatura, chegando, em janeiro, a atingir até 2,8 °C, nesta cobertura e, 2,3 °C, na vegetação. Em março, as maiores amplitudes foram 2,1 °C e 1,2 °C, respectivamente.

Em relação ao momento de ocorrência dos valores extremos, em uma e outra coberturas, as tabelas 19 e 20 mostram que, na maioria das vezes, estes ocorrem primeiro na cobertura com terraço, com diferenças de até 2 horas.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Tabela 19 - Valores máximos e mínimos da temperatura do ar externo e temperaturas superficiais internas de ambas as coberturas, bem como horário de ocorrência dos mesmos - Semana em janeiro / 96

Dia e Hora	Dia 08/01			Dia 09/01			Dia 10/01			Dia 11/01							
	Temperaturas Máximas (°C)			Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)			Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)			Temperaturas Mínimas (°C)							
Variável	14:30	22:00	1:00	3:30	7:30	14:00	20:30	21:30	3:00	9:30	10:00	12:00	19:30	20:00	5:00	9:00	10:00
Ar Externo	27.4		21.0	21.0	31.6	31.6	20.0	20.0	20.0	30.6	22.8						
Temp. Sup. Int. - CV -	23.9		23.8	23.8	26.1	26.1	25.4	25.4	26.6	26.6	25.8						
Temp. Sup. Int. - CT -	25.9		25.1	25.1	27.9	27.9	26.2	26.2	28.7	28.7	27.0						

continua...

Continuação

Dia e Hora	Dia 11/01		Dia 12/01		Dia 13/01			Dia 14/01			Média Semanal			
	Temperaturas Máximas (°C)		Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)		Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)			Temperaturas Mínimas (°C)						
Variável	13:30	21:00	22:00	14:00	1:30	9:00	10:00	13:00	19:30	20:00	5:30	10:30	12:00	
Ar Externo	35.2		20.0	27.8	19.8	19.8	28.2	28.2	18.2	18.2				24.8
Temp. Sup. Int. - CV -	27.7		↓	↓	↓	24.0	25.1	25.1	23.7	23.7				25.0
Temp. Sup. Int. - CT -	29.3		↓	↓	↓	24.4	26.0	26.0	24.1	24.1				26.2

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Tabela 20 - Valores máximos e mínimos da temperatura do ar externo e temperaturas superficiais internas de ambas as coberturas, bem como horário de ocorrência dos mesmos - Semana em março / 96

Dia e Hora	Dia 07/03				Dia 08/03				Dia 09/03				Dia 10/03					
	Temperaturas Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)					
Variável	14:00	21:30	22:30	7:00	9:00	10:00	13:30	20:00	21:00	7:00	10:00	11:00	13:30	19:30	20:00	7:00	10:00	10:30
Ar Externo	27.8			21.0	28.0				19.0	28.4						19.8		
Temp. Sup. Int. - CV -	24.0			24.8	23.6				23.8	24.9						23.9		
Temp. Sup. Int. - CT -	25.4			24.4	26.0				24.1	25.7						23.9		

continua...

Continuação

Dia e Hora	Dia 10/03				Dia 11/03				Dia 12/03				Dia 13/03					
	Temperaturas Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)					
Variável	14:00	20:00	21:30	5:00	10:00	12:30	20:00	21:00	6:00	10:30	11:00	13:00	20:30	22:00	7:00	9:30	Média Semanal	
Ar Externo	27.2			20.2	28.0				21.2	28.6					22.4			24.2
Temp. Sup. Int. - CV -	24.7			23.7	24.6				23.8	25.2					24.6			24.2
Temp. Sup. Int. - CT -	25.6			24.0	25.7				24.3	26.4					25.1			25.0

4.1.5.2. Retardo e amortecimento térmicos

Os fenômenos térmicos, tanto os que ocorrem no meio exterior quanto aqueles que têm lugar nos fechamentos dos edifícios, podem ser classificados, segundo Rivero (1986), como regime variável de transmissão de calor do tipo periódico. Uma das temperaturas varia de forma sinusoidal e igual para cada período de 24 horas (que representa de forma aproximada o comportamento da temperatura externa) e a outra mantém-se constante (representa de forma aproximada a temperatura interna e que pode ser assim considerada, porque sofre pequenas variações).

Dentro de um regime variável, o retardo térmico ($\Delta\tau$) será o tempo que leva uma diferença térmica ocorrida num dos meios (no caso, o externo) para manifestar-se na superfície oposta do fechamento (no caso, temperatura superficial interna). A capacidade de amortecimento do fechamento (no caso, cobertura com terraço ou com vegetação) é a sua propriedade de diminuir a amplitude das variações térmicas externas. Já o coeficiente de amortecimento térmico (μ) é a relação entre a amplitude da onda térmica da superfície interna e a do meio exterior; portanto, este coeficiente é sempre menor que 1 e quanto menor o seu valor, maior será a capacidade de amortecimento do fechamento.

Com a finalidade de analisar comparativamente as coberturas em estudo, a partir dos dados do item anterior (4.2.4.1c), foram determinados os valores de retardo térmico e do coeficiente de amortecimento para cada tipo de fechamento. Os valores de retardo térmico ocorridos entre as temperaturas extremas do ar externo e superficial interna variaram, na cobertura verde, entre 4 e 10,5 horas, em janeiro e entre 2,5 e 9,0 horas, em março; enquanto no terraço, oscilaram entre 4 e 8,5 horas e entre 2,0 e 7,5 horas, respectivamente. Na maioria das vezes (64%), o retardo térmico foi maior na cobertura verde, sendo 18 % das vezes iguais e menor nos outros 18 % restantes. As diferenças entre os valores de retardo térmico variou de 0,0 a 3,0 horas.

Quanto à capacidade de amortecimento de cada cobertura, a figura 39, a seguir, mostra os coeficientes de amortecimento térmico de ambos os fechamentos, calculados em relação aos valores máximos e mínimos das temperaturas do ar externo e superficial interna, no período de verão.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

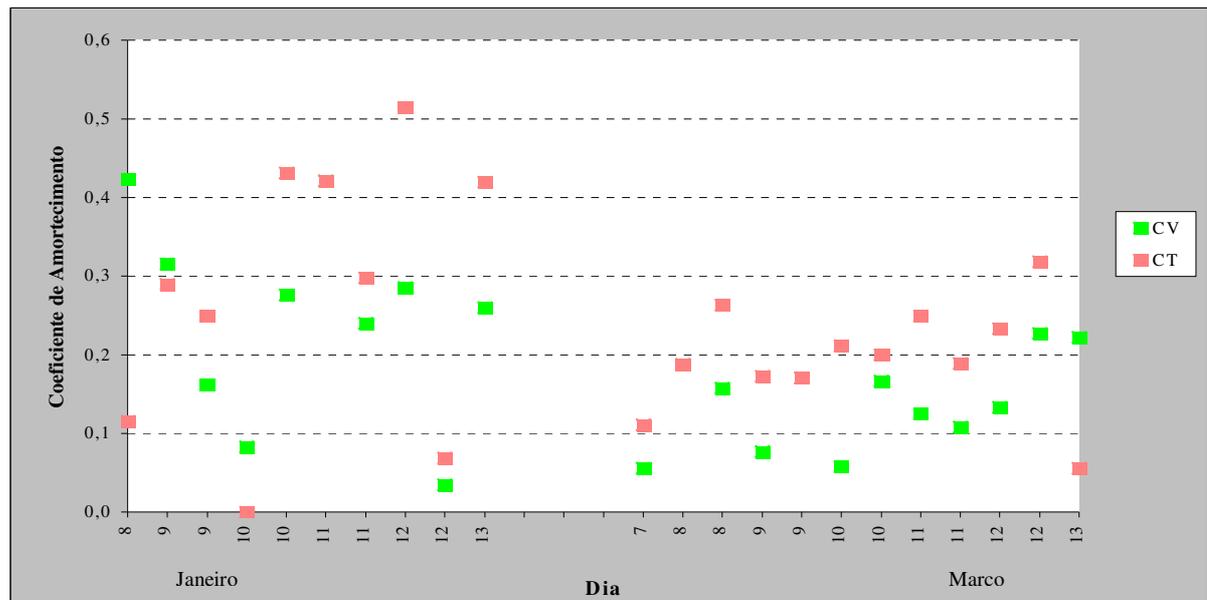


Figura 39 – Gráfico dos coeficientes de amortecimento térmico das coberturas com vegetação e com terraço, no período de verão

COMENTÁRIOS

No gráfico pode-se observar que os coeficientes de amortecimento da cobertura com vegetação variaram entre 0,03 e 0,42, em janeiro e, entre 0,06 e 0,23, em março. No terraço, este coeficiente oscilou, respectivamente, de 0,00 a 0,51 e de 0,06 a 0,32. Na maioria das vezes (68%), o coeficiente de amortecimento térmico foi menor na cobertura verde; em 14 % das vezes foram iguais e nos restantes 18%, a cobertura com terraço apresentou coeficiente menor que a vegetação. As diferenças entre os valores dos coeficientes de amortecimento térmico variou, em janeiro, entre $-0,31$ e $0,23$ e, em março, entre $-0,17$ e $0,15$. Desta forma, os dados nos indicam que a cobertura com vegetação apresenta maior capacidade de amortecer a onda térmica externa, além de registrar maior retardo.

4.1.5.3. Temperatura do ar interno

O gráfico comparativo da evolução das temperaturas do ar externo e interno sob as duas coberturas, nas semanas de janeiro e março, é mostrado na figura 40.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

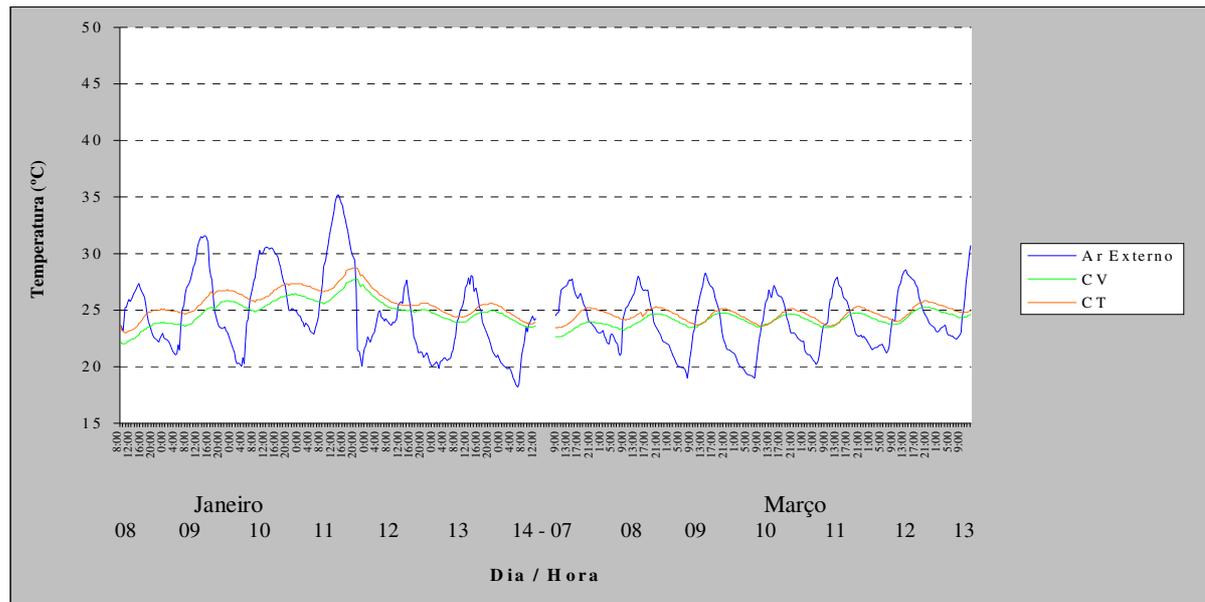


Figura 40 – Gráfico comparativo das temperaturas do ar externo e interno sob as duas coberturas, nas semanas selecionadas de verão

COMENTÁRIOS

O gráfico da figura 40 mostra que a temperatura do ar interno sob cobertura com terraço foi sempre superior a da cobertura com vegetação.

Embora a temperatura do ar exterior tenha sofrido variações diárias de até 15,2 °C, na semana de janeiro, as variações internas foram muito menores. No terraço, as variações diárias oscilaram entre 0,5 °C e 2,2 °C e, na cobertura com vegetação, entre 0,2 °C e 2,9 °C. A temperatura interna na câmara da cobertura com vegetação manteve-se sempre inferior à temperatura do terraço. Nos dias de maior variação externa, a diferença entre elas também foi maior (1,5 °C), tornando-se mínima (0,3 °C) quando a variação da temperatura externa foi menor e associada a uma baixa radiação global diária. Estatisticamente, estas diferenças são significativas. Em termos de temperatura média, obtiveram-se os seguintes resultados: a) ar externo registrou o valor mais baixo (24,8 °C); b) na cobertura com terraço, o mais elevado (25,7 °C); c) na cobertura com vegetação, temperatura média do ar interno - 24,9 °C.

Em março, as oscilações diárias do ar externo foram menores que aquelas ocorridas em janeiro, atingindo um valor máximo de 9,4 °C. As variações diárias das temperaturas internas às câmaras sob as coberturas também são pequenas e menores que as de janeiro. A temperatura do ar interno da cobertura com vegetação também, manteve-se sempre inferior

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

ou igual a da CT; a diferença entre elas variou de zero a 1,3 °C. Nesta semana a temperatura média do ar externo foi igual a temperatura do ar interno na cobertura com vegetação (24,2 °C), enquanto no interior da câmara sob o terraço registrou-se um valor médio de 24,6 °C.

4.2. ANÁLISE DO DESEMPENHO TÉRMICO DE INVERNO

O registro das medições de inverno começou no dia 23 de maio e estendeu-se durante todo o mês de junho de 1996, que apresentou temperaturas médias, precipitação pluviométrica e número de dias chuvosos inferiores aos valores normais, enquanto a radiação solar e o número total de horas de insolação foram superiores aos valores das Normais Climatológicas. A tabela 21 mostra dados médios mensais registrados no mês de junho e dados das Normais Climatológicas (1961/1990).

Os dados experimentais de inverno são relativos à semana de 31/05 a 06/06. A escolha recaiu sobre esta semana devido às baixas temperaturas registradas no período.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Tabela 21 - Dados climatológicos do mês de junho / 96

Elementos	JUNHO / 96	
	Registrado	Normal
Temperatura Média (°C)	10,1	12,6
Temperatura Média das Máximas (°C)	17,2	17,9
Temperatura Média das Mínimas (°C)	5,8	8,4
Umidade Relativa (%)	83,3	83,6
Precipitação Pluviométrica (mm)	60,0	92,8
Número de dias chuvosos	8,0	9,7
Radiação Solar (J/m ²) (x 10 ⁶)	9,47	7,49
Número de horas de Insolação	188,1	145,5
Número de dias de geada	10,0	5,0
Datas de ocorrência de geadas:	2 - 3 - 4 - 9 - 20 - 22 - 24 - 25 - 29 - 30	

Fonte: Estação Agroclimatológica de Pelotas - Convênio EMBRAPA / UFPel / INMET

Tabela 22 - Dados climáticos da semana de 31 de maio a 06 de junho / 96

Elementos	Dia						
	31/5	1/6	2/6	3/6	4/6	5/6	6/6
Temperatura Média (°C)	10,5	9,4	8,2	7,7	7,7	11,6	13,2
Temperatura Máxima (°C)	14,2	15,0	16,2	17,2	17,4	19,4	20,3
Temperatura Mínima (°C)	9,2	6,6	5,8	1,6	-1,0	4,0	9,2
Umidade Relativa (%)	78,3	70,5	72,3	78,3	90,8	90,5	92,8
Prec. Pluviométrica (mm)	1,0	-	-	-	-	-	-
Radiação Solar (J/m ²) (x10 ⁶)	6,99	10,33	13,14	12,80	12,43	8,32	9,75
N ^o horas de Insolação	4,3	7,8	9,9	8,7	9,3	3,7	5,5
Velocidade do Vento (m/s)	3,2	2,3	1,4	0,5	0,7	0,9	0,7
Direção do Vento	SW	SW	SW	SW	NE	NE	NE
Condições do Céu	PN	C / PN	C	C	C / Pn	Nv / PN	Nv / PN

Fonte: Estação Agroclimatológica de Pelotas - Convênio EMBRAPA / UFPel / INMET

Legendas: **C** – claro; **Pn** – pouca nebulosidade; **PN** – parcialmente nublado; **N** – nublado; **Nv** – nevoeiro.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

4.2.1. Dados Climáticos

Os dados climáticos, que caracterizam cada dia da semana selecionada no inverno, são apresentados na tabela 22, acima. Estes dados climáticos foram levantados e fornecidos pela Estação Agroclimatológica de Pelotas - Convênio EMBRAPA/UFPel/INMET. A figura 41 mostra o gráfico de evolução da temperatura externa e a figura 42 apresenta as radiações global e difusa. Estes dados climáticos foram registrados no experimento, sendo que os dados de radiação difusa, assim como os de verão, estão sem a correção devida à obstrução gerada pelo dispositivo de sombreamento.

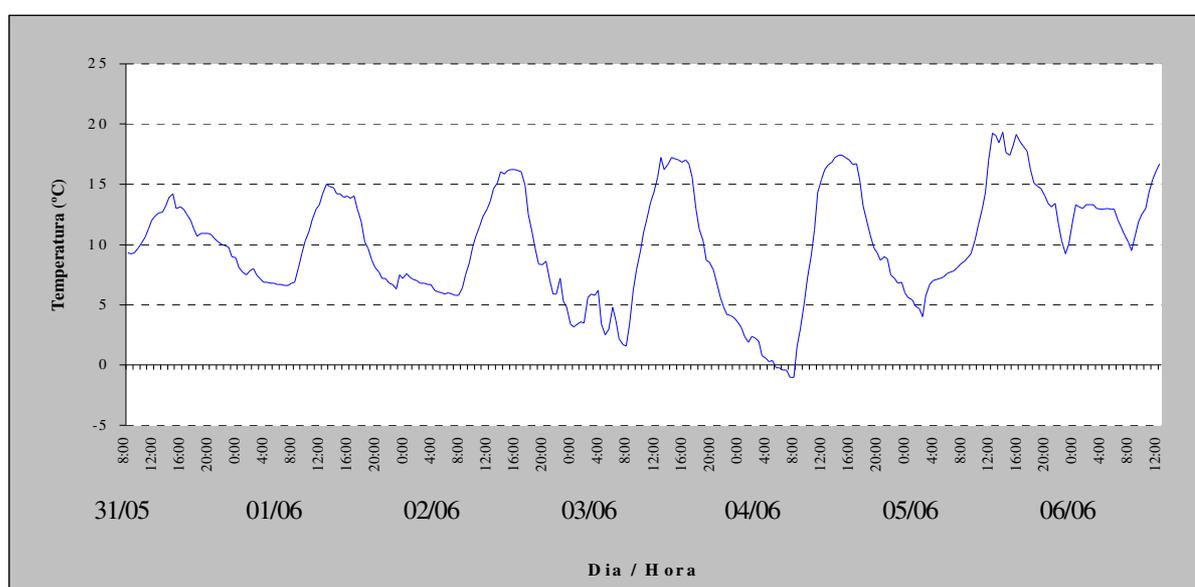


Figura 41 – Gráfico de temperatura do ar externo, na semana selecionada de inverno

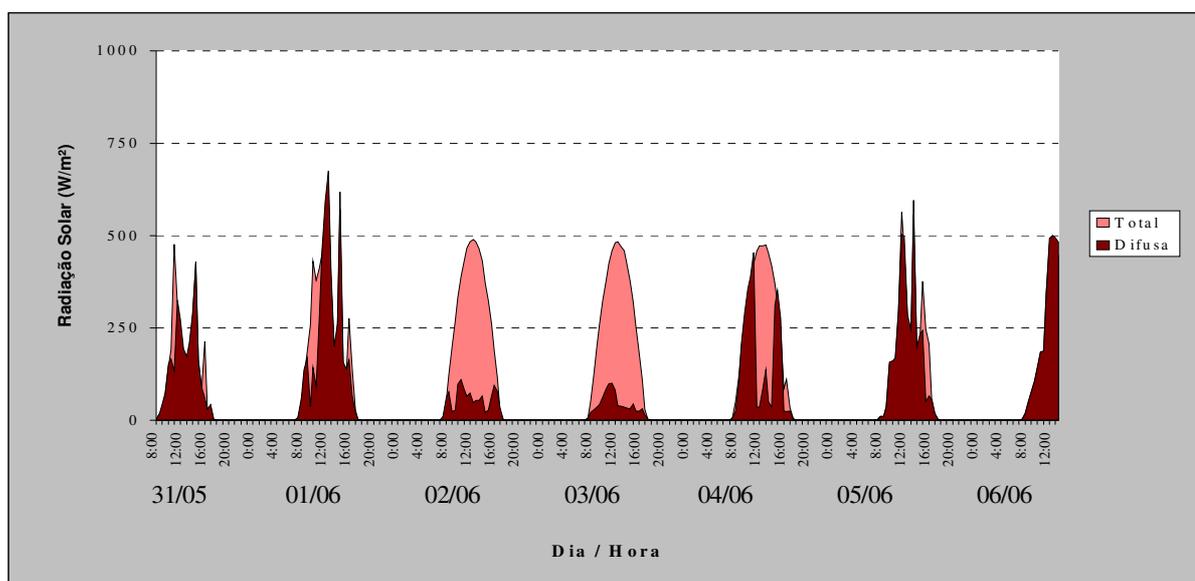


Figura 42 – Gráfico de radiação solar total e difusa, na semana selecionada de inverno

4.2.2. Dados da Cobertura com Vegetação

4.2.2.1. Temperaturas superficiais

Os dados de temperatura superficial, obtidos na cobertura com vegetação, podem ser observados na figura 43 e na tabela 23. O gráfico da figura 43 mostra a evolução das temperaturas superficiais, em cada camada monitorada da cobertura com vegetação, durante a semana analisada, no período de inverno, enquanto a tabela 23 apresenta os valores máximos e mínimos destas temperaturas. Além disto, são mostrados os respectivos horários de ocorrência, bem como as diferenças de temperaturas entre uma e outra camada. Os dados desta tabela resumem, pois, informações básicas para a análise do retardo e amortecimento térmicos.

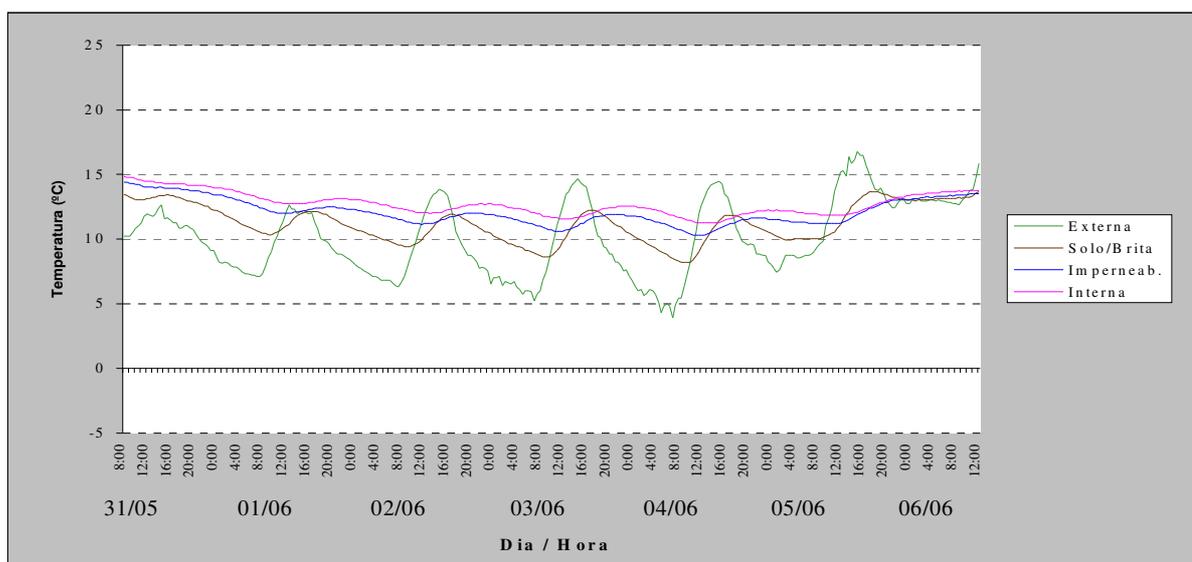


Figura 43 - Gráfico das temperaturas superficiais nas camadas monitoradas da cobertura com vegetação, na semana selecionada de inverno

COMENTÁRIOS

O gráfico da figura 43 mostra que, assim como no verão, a temperatura superficial externa é aquela que sofre maiores oscilações diárias. O comportamento da curva que descreve a evolução desta temperatura repete-se a cada dia e é semelhante ao que ocorre no verão, porém com amplitudes diárias menores. Os dados da tabela 23 indicam que, durante aquela semana, analisada no inverno, a maior oscilação diária registrada foi $10,8^{\circ}\text{C}$, ocorrida entre os dias 3 e 4/06, e a mínima, $4,3^{\circ}\text{C}$, ocorrida em 5/06. A temperatura superficial externa atingiu o valor máximo de $16,8^{\circ}\text{C}$ (05/06) e o mínimo, de $3,9^{\circ}\text{C}$ (04/06).

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Quanto à temperatura na interface solo/manta geotêxtil, os gradientes diários variaram de 0,7 a 4,0 °C, ocorridos, respectivamente entre os dias 5-6 e 3-4. A temperatura máxima atingida, nesta interface, foi de 13,6 °C (05/06), e a mínima, de 8,2 °C (04/06).

A temperatura na camada de proteção mecânica da impermeabilização sofreu variações diárias que oscilaram entre 0,4 °C (entre os dias 4 e 5/06) e 1,6 °C (entre os dias 3 e 4/06). Os valores extremos da temperatura neste nível foram: máxima de 12,5 °C (01/06) e mínima de 10,3 °C (04/06).

A temperatura superficial interna foi a que menos sofreu variações. Sua amplitude diária variou de 0,4 °C (nos dias 01 e 05/06) a 1,3 °C (entre os dias 3 e 4/06). Os valores máximo e mínimo atingidos foram 13,2 °C (01/06) e 11,3 °C (04/06), respectivamente.

Observando ainda a tabela 23, nota-se que os valores extremos de temperatura superficial, ocorridos externamente, refletiram-se na interface solo/manta com amortecimento que variou de 0,4 °C a 4,3 °C e retardo, que oscilou de 1 a 4,5 horas. Em relação aos extremos verificados na interface solo/manta e na impermeabilização, as diferenças de temperatura variaram entre 0,1 °C e 2,1 °C e com retardo térmico de até 4,5 horas. Na última camada, o amortecimento entre os valores extremos ocorridos na impermeabilização e na superfície interna oscilou entre 0,7 e 1,0 °C, com retardo térmico variando de 0,5 a 3,0 horas. Assim, os extremos ocorridos na superfície externa manifestaram-se na superfície interna com amortecimentos que variaram, dia a dia, de 0,5 a 7,4 °C e com retardo térmico de 4 a 8,5 horas.

A figura 44, a seguir, mostra as curvas de diferenças entre as temperaturas superficiais nas várias camadas constituintes da cobertura verde. Observa-se, no gráfico, que as curvas descrevem um comportamento esperado, isto é: a curva, que registra as diferenças entre as temperaturas superficial externa e na interface solo/manta, é a mais acentuada, enquanto a curva que apresenta menores variações é aquela que representa a diferença entre as temperaturas na impermeabilização e a superficial interna. A curva das diferenças, entre as temperaturas superficial externa e na interface solo/manta indica que, ao longo do dia, houve inversão do fluxo de calor na camada de solo. As maiores diferenças registram-se quando esfria a superfície externa. Tais diferenças variaram entre 0,0 e 4,7 °C.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

A curva das diferenças, entre as temperaturas na interface solo/manta e na impermeabilização, mostra que também houve inversão do fluxo de calor entre estes níveis, com exceção dos dias 31/05 e 01/06, e que, na maior parte do tempo, a impermeabilização teve temperatura mais elevada. Estas diferenças chegaram até $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Já a curva das diferenças entre as temperaturas na impermeabilização e na superfície interna mostra que o fluxo de calor é sempre de dentro para fora, pois as diferenças são sempre negativas, indicando que a superfície interna tem temperatura maior. A maior diferença registrada nesta camada foi de $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Considerando toda a espessura da cobertura, a maior diferença registrada entre as temperaturas superficiais externa e interna atingiu valor máximo de $7,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, sendo mais elevada a temperatura superficial interna, conforme pode ser observado no gráfico.

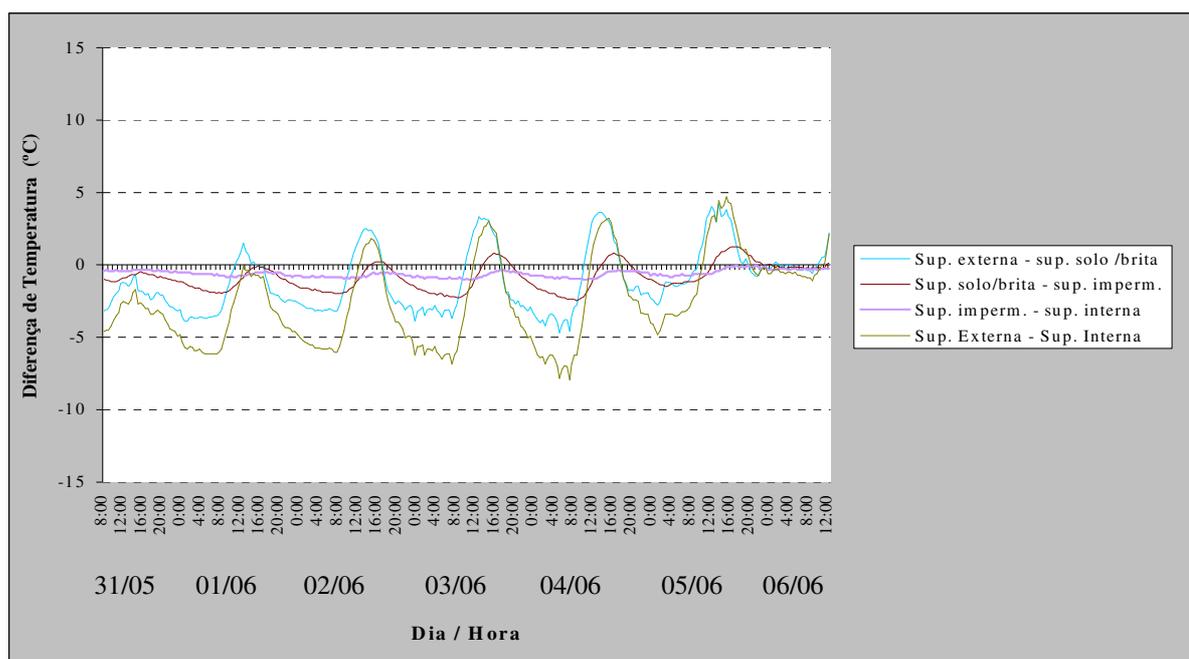


Figura 44 – Gráfico das diferenças de temperaturas superficiais nas camadas constituintes da cobertura com vegetação, na semana selecionada de inverno

4.2.2.2. Temperaturas do ar e de globo

Durante a semana analisada, no período de inverno, na câmara, sob a cobertura com vegetação, os dados obtidos, de temperatura do ar interno e de globo, podem ser observados no gráfico da figura 45, onde estão confrontados com a evolução da temperatura do ar externo.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

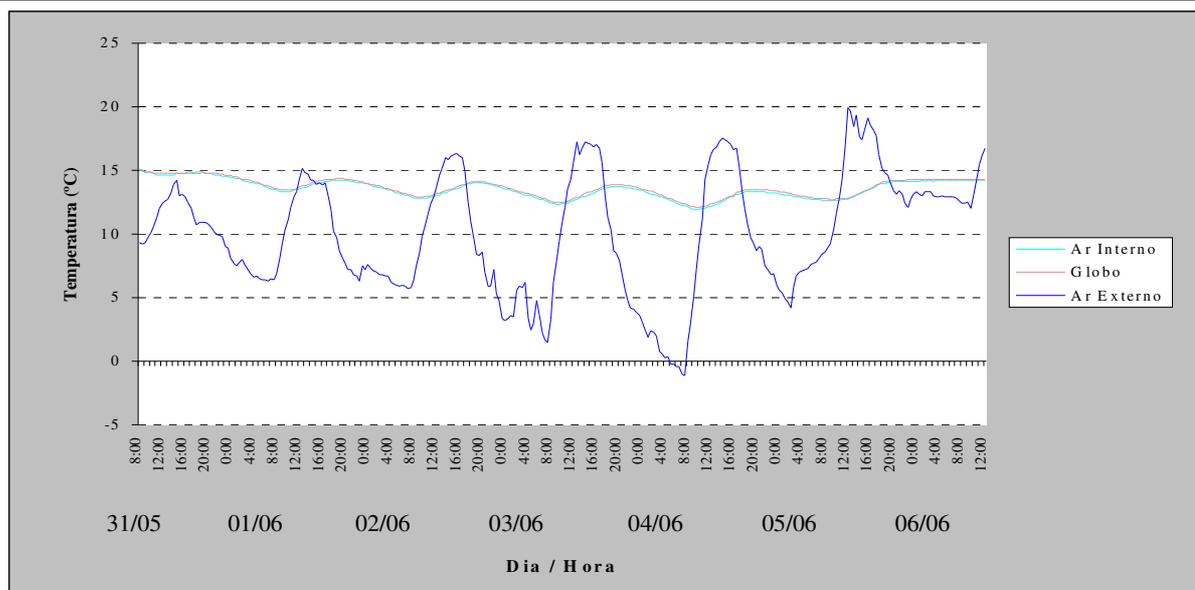


Figura 45 – Gráfico de temperaturas do ar externo e interno e temperatura de globo, na cobertura com vegetação, na semana analisada de inverno

A tabela 24 complementa as informações da figura anterior, mostrando os valores máximos e mínimos das temperaturas do ar externo e interno, bem como os horários de ocorrência dos mesmos e a diferença entre elas.

Tabela 24- Valores máximos e mínimos das temperaturas do ar externo e interno na cobertura com vegetação - Semana de 31/05 a 06/06/96.

Dia e Hora	Dia 31/05		Dia 01/06				Dia 02/06				Dia 03/06	
	Temperaturas Máximas (°C)		Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)	
Variável	14:30	19:00	6:30	8:30	12:30	17:30	7:00	8:00	15:00	18:30	7:30	9:00
Ar Externo	14.2		6.6		15.0		5.8		16.2		1.6	
Ar Interno	14.8	(-0.6)	13.3	(-6.7)	14.2	(0.8)	12.8	(-7.0)	14.0	(2.2)	12.3	(-10.7)

continua...

continuação

Dia e Hora	Dia 03/06		Dia 04/06				Dia 05/06				Dia 06/06	
	Temperaturas Máximas (°C)		Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)	
Variável	12:30	18:30	7:30	9:00	14:00	18:00	2:00	7:30	12:00	22:30		
Ar Externo	17.2		-1.0		17.4		4.0		19.2		9.2	
Ar Interno	13.7	(3.5)	11.9	(-12.9)	13.3	(4.1)	12.6	(-8.6)	↑		↑	

COMENTÁRIOS

A figura 45 mostra, graficamente, a diferença entre as temperaturas do ar interno e a de globo, na câmara sob a cobertura com vegetação. As curvas são muito próximas, com pequenas diferenças (variando de $0,1^{\circ}\text{C}$ a $0,3^{\circ}\text{C}$), considerando a incerteza de medição ($\pm 0,1^{\circ}\text{C}$). A temperatura de globo foi sempre superior à do ar, indicando um pequeno ganho de calor por radiação. No entanto, este pequeno ganho não é devido à laje, pois sua temperatura superficial foi sempre inferior à do ar interno (diferenças entre $0,1$ e $1,6^{\circ}\text{C}$).

O ar interno atingiu, durante esta semana, temperatura máxima de $14,8^{\circ}\text{C}$, no dia 31/05 e mínima de $11,9^{\circ}\text{C}$. O valor mínimo da temperatura do ar interno ocorreu na mesma madrugada em que a temperatura externa atingiu valor mínimo: $-1,0^{\circ}\text{C}$. Durante esta semana, o ar interno apresentou temperatura média de $12,7^{\circ}\text{C}$, portanto superior à média externa, de $10,3^{\circ}\text{C}$.

Como era esperado, a amplitude das variações diárias do ar interno foi bem inferior à do ar externo. Tal amplitude oscilou entre $0,7^{\circ}\text{C}$ e $1,8^{\circ}\text{C}$, enquanto externamente, entre $7,6$ e $18,4^{\circ}\text{C}$.

Os valores extremos da temperatura do ar externo fizeram-se sentir, internamente, com retardo térmico, que variou de 1 a 10,5 horas e com diferenças de temperaturas (amortecimento) oscilando entre $0,6$ e $12,9^{\circ}\text{C}$, conforme indica a tabela 24.

As diferenças entre as temperaturas do ar externo e interno evoluem de acordo com a curva mostrada no gráfico da figura 46. As maiores diferenças, que chegaram até $13,3^{\circ}\text{C}$, foram registradas nos dias em que a temperatura externa foi mais baixa.

4.2.2.3. Umidade do solo

Os dados de umidade do solo, referentes ao período de inverno, são mostrados na figura 47. Além destes, são apresentados os valores do potencial mátrico correspondente. Conforme as considerações do item 4.1.2.2, os dados do potencial mátrico foram lidos diretamente no tensiômetro; alguns, de umidade, obtidos através do método gravimétrico e outros, ainda, calculados pela curva de ajuste (Figura 29).

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

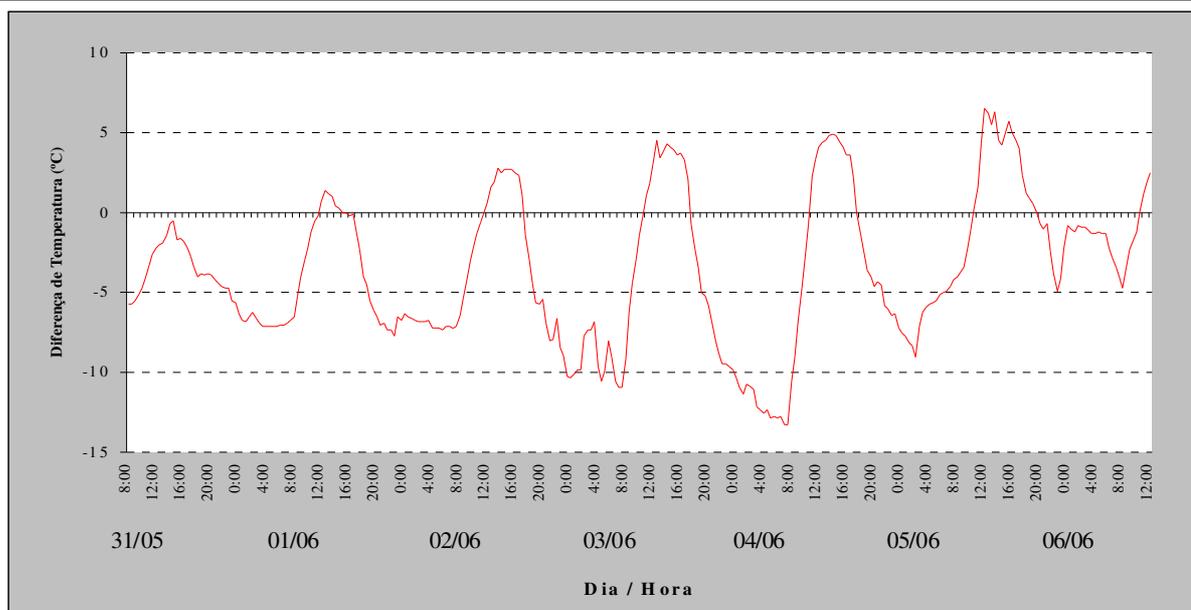


Figura 46 – Gráfico das diferenças de temperaturas do ar externo e interno da cobertura com vegetação, na semana seleccionada de inverno

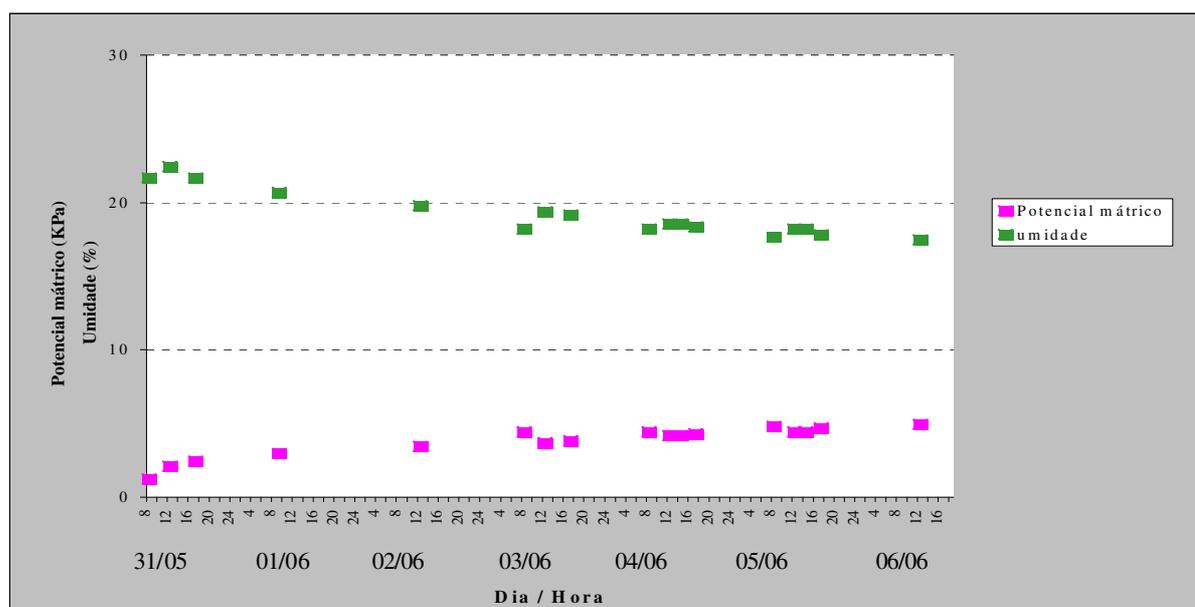


Figura 47 – Gráfico dos dados do potencial mátrico e respectiva umidade volumétrica do solo empregado na cobertura verde, durante a semana analisada no período de inverno

A figura 48, abaixo, mostra os dados de umidade confrontados com os de radiação solar global diária e a evolução da diferença entre as temperaturas nas superfícies superior e inferior da camada de solo, ao longo da semana.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

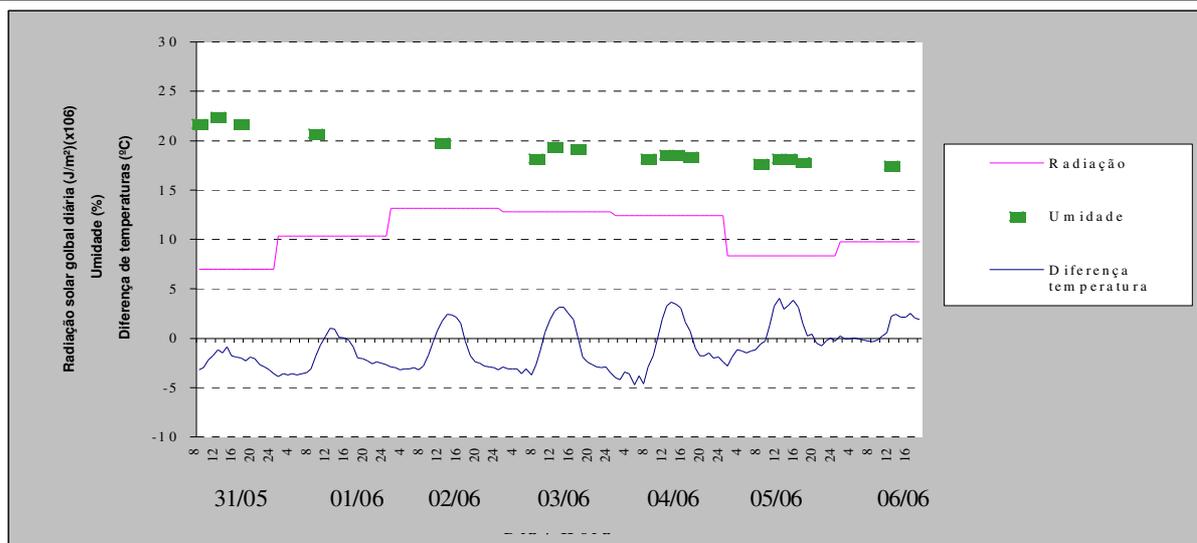


Figura 48 – Gráfico de radiação solar global diária, umidade do solo e diferença de temperaturas nas superfícies da camada do solo, durante o período de inverno analisado

COMENTÁRIOS

O gráfico da figura 47, mostra que houve um decréscimo da umidade ao longo da semana, já que a única precipitação ocorreu no dia 31/05 e não houve irrigação, pois os valores lidos no tensiômetro permaneceram baixos.

Assim, como na semana analisada em março, nota-se, no gráfico da figura 48, uma tendência, ao longo do período, de aumento nas diferenças de temperaturas nas faces da camada de solo com o decréscimo da umidade.

4.2.3. Dados da Cobertura com Terraço

4.2.3.1. Temperaturas superficiais

Os dados de temperatura superficial obtidos na cobertura com terraço estão registrados na figura que se segue. A figura 49 mostra a evolução das temperaturas nos três níveis monitorados desta cobertura, durante a semana analisada no período de inverno. A tabela 25 apresenta, de forma resumida, os valores máximos e mínimos da temperatura superficial, em cada camada monitorada da cobertura com terraço, além dos horários de ocorrência e da diferença entre elas, complementando, assim, o gráfico. Os dados da tabela 25 são de importância para a análise de retardo e amortecimento térmicos.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

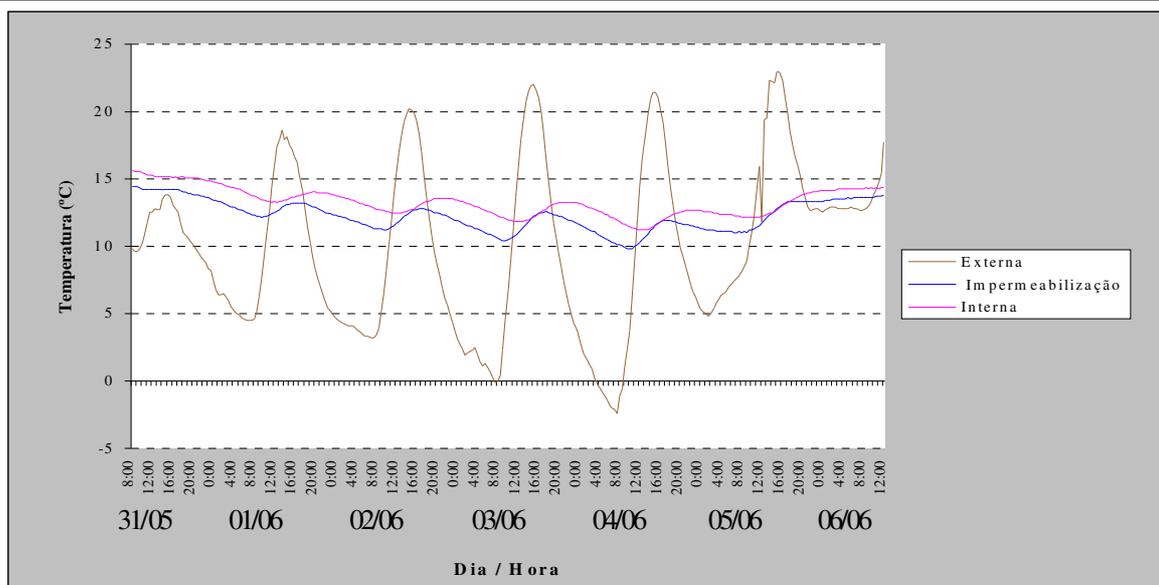


Figura 49 – Gráfico das temperaturas superficiais nas camadas monitoradas da cobertura com terraço, na semana selecionada de inverno

COMENTÁRIOS

O gráfico da figura 49 mostra que a curva da temperatura superficial externa sofre oscilações diárias de maior amplitude, quando comparada com às da temperatura na impermeabilização e superficial interna. Este comportamento é semelhante aos verificados no verão e na cobertura com vegetação, no inverno, como seria esperado. A evolução da curva se repete a cada dia, atingindo valores máximo e mínimo, em horários muito próximos aos de temperatura do ar externo extremos. Esta curva é semelhante à que ocorre no período de verão, porém com amplitudes diárias menores. Os dados da tabela 24 indicam que, durante a semana analisada no inverno, as oscilações diárias máxima e mínima desta temperatura foram: 24,4 °C, entre os dias 3 e 4 de junho e 9,3 °C, ocorrido entre os dias 31/05 e 01/06, respectivamente. A temperatura superficial externa atingiu os valores máximo e mínimo de 22,9 °C (05/06) e 2,4 °C negativos (04/06), respectivamente.

A temperatura na camada de proteção mecânica da impermeabilização, assim como a temperatura superficial interna, sofre oscilações diárias muito menores, variando de 0,9 °C (entre os dias 4 e 5/06) a 2,8 °C (entre os dias 3 e 4/06). O valor máximo da temperatura, neste nível, foi 13,2 °C, enquanto o mínimo foi 9,8 °C (dia 04/06).

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Tabela 25 – Temperaturas superficiais máximas e mínimas nas camadas constituintes da cobertura com terraço Semana de 31/05 a 06/06/96

Dia e Hora	Dia 31/05				Dia 01/06				Dia 02/06				Dia 03/06			
	Temperaturas Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)			
Nível	14:30	6:30	9:30	11:30	13:30	15:30	19:30	7:00	9:30	11:00	14:30	16:30	19:30	7:30	9:00	11:00
Externo	13.8	4.5		18.6	3.2	13.2 (5.4)		20.2	11.2 (-8.0)	12.8 (7.4)		13.5(-0.7)		-0.1		10.4 (-10.5)
Imperm.	↓															
Interna	↓			13.2 (-1.1)	14.1(-0.9)			12.4 (-1.2)								11.8 (-1.4)

continua...

Continuação

Dia e Hora	Dia 03/06				Dia 04/06				Dia 05/06				Dia 06/06			
	Temperaturas Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)			
Nível	15:00	17:30	20:00	7:30	9:30	11:30	14:30	16:30	21:00	1:30	6:30	8:00	15:00	0:00		
Externo	22.0			-2.4	21.4	4.8			22.9					12.5		
Imperm.	12.6 (9.4)				9.8 (-12.2)	11.9 (9.5)			↑							
Interna	13.2(-0.6)				11.2 (-1.4)	12.6(-0.7)			12.1 (-1.1)							↑

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

A temperatura superficial interna sofreu variações diárias semelhantes às do nível anterior, porém pouco menores. Sua amplitude diária variou de 0,5 °C, ocorrida entre os dias 4 e 5/06, a 2,0 °C, ocorrida entre os dias 3 e 4/06. Os valores máximo e mínimo foram 14,1 °C (01/06) e 11,2 °C (04/06), respectivamente. As temperaturas mínimas, em todos os níveis, ocorreram no mesmo dia, ou seja na madrugada do dia 04/06, quando a temperatura do ar externo também atingiu valor mínimo (-1,0 °C), durante tal semana.

Os valores extremos da temperatura superficial externa, conforme pode ser observado na tabela 24, fizeram-se sentir no nível da impermeabilização, com retardos que variaram de 1,5 a 5 horas e com amortecimento, de 5,4 a 12,2 °C. Na camada entre a impermeabilização e a superfície interna, os amortecimentos verificados entre os valores extremos registrados nestes níveis, variaram de 0,6 a 1,4 °C, com retardo, entre 1,5 e 4,0 horas. Assim, os valores extremos da temperatura superficial externa refletiram-se na superfície interna com retardo que variou de um dia para o outro, de 3,5 a 6,5 horas e com amortecimento térmico oscilando entre 4,5 e 19,2 °C.

A figura 50 mostra as curvas de diferenças entre as temperaturas superficiais na cobertura com terraço. O gráfico exhibe curvas que descrevem um comportamento esperado. As diferenças entre as temperaturas superficial externa e na impermeabilização são as mais acentuadas; apresentando-se, quase sempre, positivas no período da tarde, devido à presença de radiação solar, que eleva a temperatura externa. A maior diferença absoluta registrada foi 13,2 °C.

As diferenças registradas entre as temperaturas na impermeabilização e a superficial interna sofrem pequenas variações e são sempre negativas, indicando que o fluxo de calor é no sentido interno/externo. Sua oscilação variou de 0,0 a -1,8 °C.

Nota-se no gráfico, que a curva das diferenças entre as temperaturas superficial externa e na impermeabilização é muito próxima à curva das diferenças entre as temperaturas superficiais externa e interna, indicando que a maior parte do amortecimento da temperatura superficial externa ocorreu na camada superior monitorada, onde está o isolamento térmico; na camada inferior, o amortecimento verificado é pequeno, conforme indica a curva das diferenças entre as temperaturas superficiais na impermeabilização e interna.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

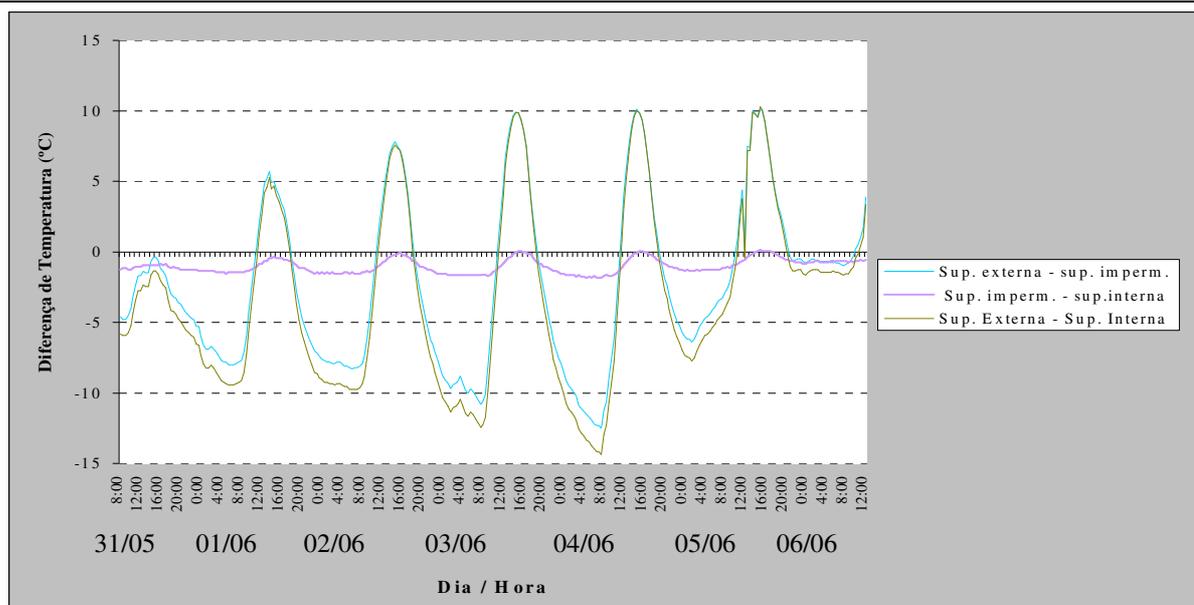


Figura 50 – Gráfico das diferenças de temperaturas superficiais nas camadas constituintes da cobertura com terraço, na semana selecionada de inverno

4.2.3.2. Temperaturas do ar e de globo

A figura 51 mostra a evolução das temperaturas de ar externo, interno e de globo obtidos, no período de inverno, na câmara sob a cobertura com terraço. A tabela 26 apresenta os valores máximos e mínimos das temperaturas do ar interno e externo, além dos horários de ocorrência dos mesmos, bem como as diferenças entre elas.

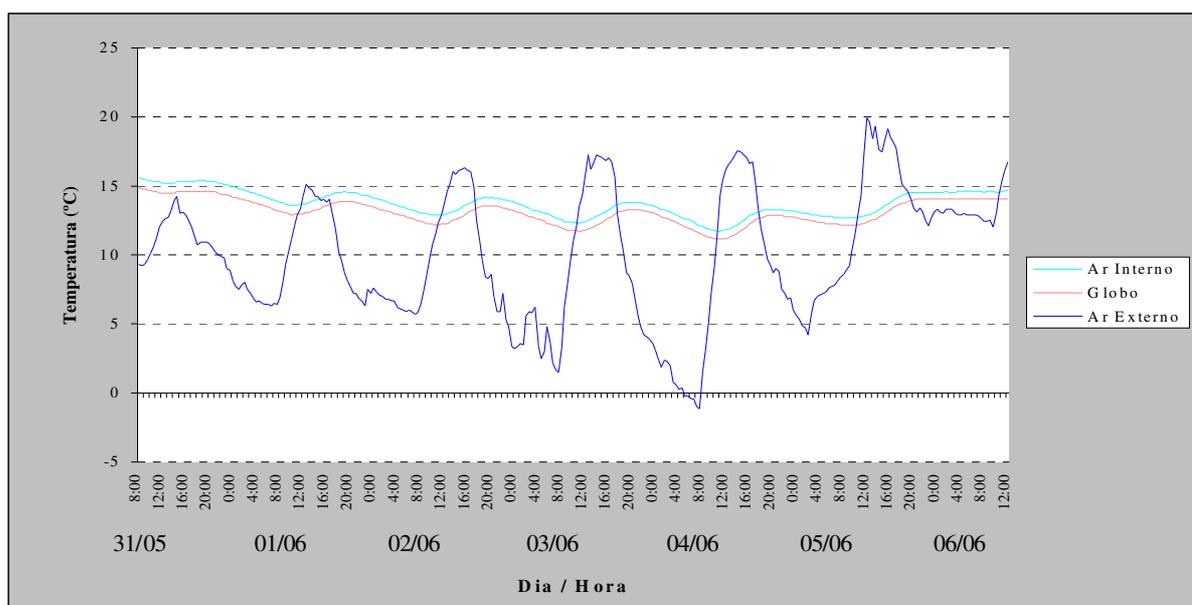


Figura 51 – Gráfico de temperaturas do ar externo e interno e temperatura de globo, na cobertura com terraço, na semana selecionada de inverno

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Tabela 26- Valores máximos e mínimos das temperaturas do ar externo e interno na cobertura com terraço - Semana de 31/05 a 06/06/96

Dia e Hora	Dia 31/05	Dia 01/06				Dia 02/06				Dia 03/06
	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)
Variável	14:30 18:00	6:30 9:30	12:30 19:00		7:00 9:30	15:00 19:00			7:30 10:30	
Ar Externo	14.2	6.6	15.0		5.8	16.2			1.6	
Ar Interno	15.4 (-1.2)	13.6 (-7.0)	14.6 (0.4)		12.9 (-7.1)	14.2 (2.0)			12.3 (-10.7)	

continua....

continuação

Dia e Hora	Dia 03/06	Dia 04/06				Dia 05/06				Dia 06/06
	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)
Variável	12:30 18:30	7:30 10:30	14:00 18:30		2:00 6:30	12:00 22:30				
Ar Externo	17.2	-1.0	17.4		4.0	19.2	9.2			
Ar Interno	13.8 (3.4)	11.7(-12.7)	13.3 (4.1)		12.7 (-8.7)	↑			↑	

COMENTÁRIOS

O gráfico da figura 51 evidencia, de forma qualitativa, que a diferença entre as temperaturas do ar interno e de globo é significativa. Tal diferença manteve-se, a maior parte do tempo, em 0,6 °C, atingindo o mínimo de 0,3 °C e o máximo de 0,8 °C. A temperatura do ar foi sempre superior à de globo, indicando que as temperaturas das superfícies circundantes (piso, paredes e teto) deveriam ser inferiores, o que foi confirmado para a temperatura superficial interna da cobertura (teto), a qual manteve-se menor que à do ar interno, com diferenças variando entre 0,0 e 1,3 °C.

A temperatura do ar interno, durante o período de inverno analisado, atingiu o valor máximo de 15,4 °C, no dia 31 de maio, e o mínimo de 11,7 °C, registrado no dia 04/06, conforme pode ser observado no gráfico da figura 64 e na tabela 26. Esta temperatura sofreu variações diárias que oscilaram entre 0,6 °C e 2,1 °C no decorrer da semana, enquanto, externamente, a temperatura do ar variou de 7,6 °C a 18,4 °C.

Conforme ainda observado na tabela 26, os valores extremos da temperatura do ar externo manifestaram-se no ar interno, com amortecimento que variou entre 0,4 e 12,7 °C e com retardo térmico, de 2,5 a 10,5 horas. Durante esta semana, a temperatura média do ar interno (13,8 °C), na cobertura com terraço, foi superior à do ar externo (10,3 °C), apresentando uma diferença de 3,5 °C.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

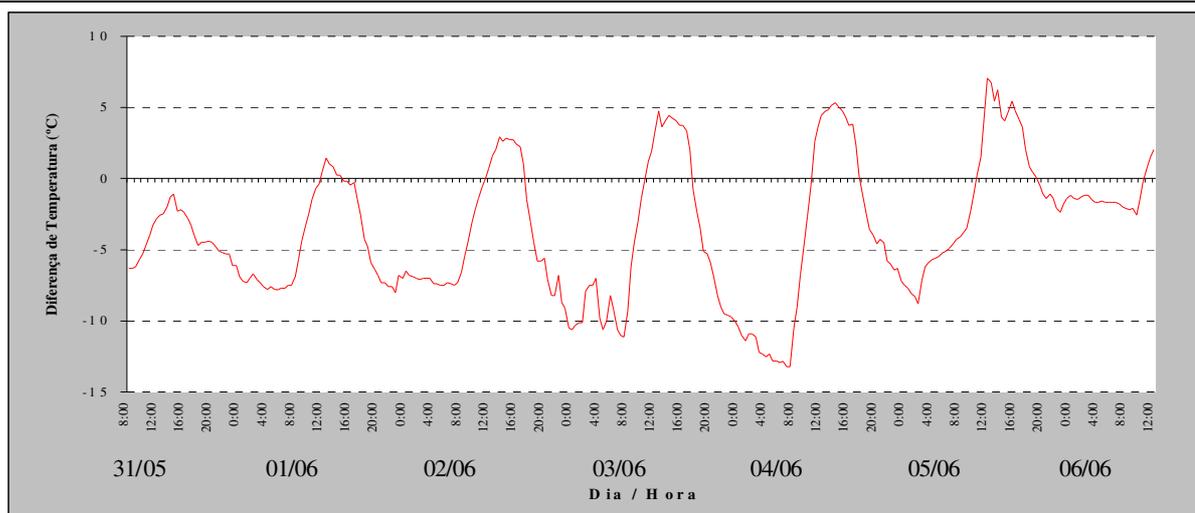


Figura 52 – Gráfico das diferenças de temperaturas do ar externo e interno da cobertura com terraço, na semana selecionada de inverno

A figura 52 mostra o comportamento da diferença entre estas temperaturas ao longo deste período. Nota-se, neste gráfico, que as maiores diferenças foram negativas e verificaram-se quando a temperatura externa atingiu valores mínimos, indicando, assim, que o ar interno, na maior parte do tempo, apresentou temperatura mais elevada e que quanto maior a variação externa, maior a diferença, que chegou a atingir 13,2 °C.

4.2.4. Análise Estatística dos Dados

Após o levantamento dos dados de inverno, foram realizadas as análises estatísticas previstas no item 3.3.2, cujos resultados são apresentados abaixo.

a) Temperaturas superficiais (externa, interna e na camada de proteção mecânica da impermeabilização)

Assim como nos dados de verão, foram realizadas duas análises de variância para cada temperatura superficial, correspondentes aos horários de temperatura máxima (14 horas) e mínima (7 horas) do ar externo. Para estas variáveis, o projeto adotado considerou os seguintes fatores: dia (A), tipo de cobertura (B – vegetação / terraço) e posição do sensor (C – central / lateral). Os resultados permitem afirmar, resumidamente, o que segue:

➤ fator A (dia):

- significativo em todas as análises realizadas, tal como no período de verão. Logo, as temperaturas superficiais registradas diferem de dia para dia.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

- fator B (tipo de cobertura)
 - significativo em todas as análises feitas para as temperaturas superficial externa e interna e na análise realizada com dados da temperatura superficial na camada de proteção mecânica da impermeabilização, relativos ao horário das 14 horas. A significância destas diferenças foi confirmada por comparação múltipla de médias. Assim, também no inverno as coberturas com vegetação e terraço diferem entre si, em relação às temperaturas superficiais.
 - não significativo na análise realizada com dados da temperatura superficial na camada de proteção mecânica da impermeabilização, relativo ao horário das 7 horas.
- fator C (posição do sensor):
 - significativo em todas as análises feitas para as temperaturas superficiais interna e na camada de proteção mecânica da impermeabilização. Quanto à temperatura superficial na impermeabilização, as comparações múltiplas de médias não confirmam como significativa a diferença entre as temperaturas de uma e outra posição, no horário das 14 horas, nas duas coberturas. Quanto à temperatura superficial interna, as comparações múltiplas confirmam a significativa diferença entre as temperaturas das posições central e lateral, na cobertura com vegetação e no horário das 7 horas, na cobertura com terraço.
 - não significativo nas análises realizadas para a temperatura superficial externa.
- interação entre os fatores B e C:
 - não significativo em todas as análises realizadas com dados das temperaturas superficiais interna e na camada de proteção mecânica da impermeabilização; na análise feita para os dados de temperatura superficial externa, no horário das 7 horas.
 - pouco significativo na análise feita para os dados de temperatura superficial externa, no horário das 14 horas.

b) Temperatura do ar interno e temperatura de globo

Para analisar essas variáveis, foram realizadas duas análises de variância, correspondentes aos horários de temperatura máxima (19 horas) e mínima (9 horas) do ar interno. No projeto estatístico adotado, são considerados os seguintes fatores: dia (A), tipo de cobertura (B – vegetação / terraço) e medida interna (C – temperatura do ar interno / temperatura de globo). Os resultados obtidos são:

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

- fator A (dia):
 - significativo em todas as análises realizadas, tal como no período de verão. Assim, as medidas internas de temperatura do ar e de globo diferem dia a dia.
- fator B (tipo de cobertura)
 - não significativo em todas as análises realizadas, isto é, quanto as medidas internas, os tipos de coberturas estudadas (vegetação e terraço) não diferem entre si.
- fator C (medidas internas):
 - significativo em todas as análises realizadas. A comparação múltipla de médias confirma que, na cobertura com terraço, a diferença entre as temperaturas do ar e de globo é significativa e, que na cobertura com vegetação, o é somente no horário das 9 horas. Também é confirmada como significativa a diferença entre as temperaturas do ar interno das câmaras sob uma e outra cobertura.
- interação entre os fatores B e C:
 - significativo em todas as análises feitas.

DISCUSSÃO:

Discutindo os resultados acima, pode-se afirmar que:

- as coberturas com vegetação e terraço apresentaram comportamentos diferentes entre si, considerando as temperaturas superficiais registrados em condições climáticas de inverno;
- a hipótese de fluxo unidimensional de calor não foi, estatisticamente, confirmada para os dados de inverno, pois o fator C (posição do sensor) apresentou-se significativo nas análises realizadas para as temperaturas superficiais interna e na impermeabilização. Mesmo assim, as comparações múltiplas de médias realizadas nem sempre confirmaram a significância destas diferenças, quando comparadas as temperaturas superficiais medidas nas posições central e lateral de cada cobertura. Mesmo não sendo confirmada a hipótese de fluxo unidimensional de calor, os dados de temperaturas superficiais apresentados no trabalho são referentes ao ponto central da laje, já que o fator C apresentou-se não significativo para a variável que sofreu maiores variações - temperatura superficial externa;
- as coberturas verde e com terraço também apresentaram diferentes comportamentos entre si: quando consideradas as variáveis internas medidas nas câmaras sob cada cobertura e quando comparadas somente as temperaturas do ar interno;
- na cobertura com vegetação, internamente, foi variável o efeito de radiação, pois nem sempre a diferença entre as temperaturas do ar e de globo apresentou-se significativa;

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

- na cobertura com terraço, as diferenças entre as temperaturas do ar e de globo apresentaram-se significativas, sendo superior sempre a primeira, indicando que a temperatura média radiante das superfícies internas era inferior à do ar.

4.2.5. Análise Comparativa entre as Coberturas

4.2.5.1. Temperaturas superficiais

a) Temperatura superficial externa

A comparação entre as temperaturas superficiais externas de ambas coberturas é mostrada, de forma qualitativa, no gráfico da figura 53, onde estão registradas as evoluções das mesmas, no período de inverno, confrontadas com a temperatura do ar externo e com a radiação solar global diária. A tabela 27 complementa a figura anterior, mostrando os valores extremos de cada variável e o respectivo horário de ocorrência, bem como a diferença entre as temperaturas do ar e a superficial externa de cada cobertura.

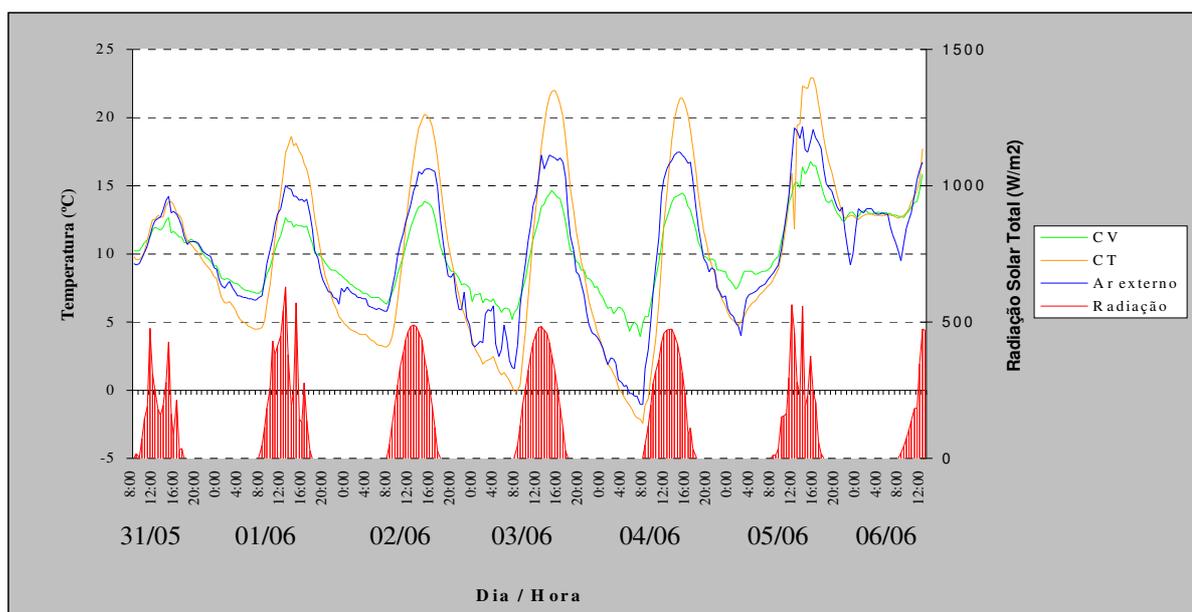


Figura 53 – Gráfico comparativo das temperaturas superficiais externas das duas coberturas e do ar externo, bem como a radiação solar total. Período: 31/05 a 06/06

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Tabela 27 - Valores máximos e mínimos da temperatura do ar externo e temperaturas superficiais externas de ambas as coberturas, bem como horário de ocorrência dos mesmos e radiação solar global diária - - Semana de 31/05 a 06/06/96

Dia e Hora	Dia 31/05		Dia 01/06		Dia 02/06		Dia 03/06				
	Temperaturas Máximas (°C)		Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)		Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)		Temperaturas Mínimas (°C)				
Variável	14:30	6:30	7:00	12:30	13:30	7:00	7:30	14:30	15:00	7:00	7:30
Ar Externo	14.2	6.6	15.0	15.0	5.8	16.2	16.2	16.2	16.2	1.6	1.6
Temp. Sup. Ext. - CV -	12.7 (1.5)	7.1 (-0.5)	12.7 (2.3)	6.3 (-0.5)	13.9 (2.3)	5.2 (-3.6)	5.2 (-3.6)	5.2 (-3.6)	5.2 (-3.6)	-0.1 (1.7)	-0.1 (1.7)
Temp. Sup. Ext. - CT -	13.8 (0.4)	4.5 (2.1)	18.6 (-3.6)	3.2 (2.6)	20.2 (-4.0)	13.14 x 10 ⁶	13.14 x 10 ⁶	13.14 x 10 ⁶	13.14 x 10 ⁶	13.14 x 10 ⁶	13.14 x 10 ⁶
Radiação solar global diária (J/m ²)	6.99 x 10 ⁶										

continua...

Continuação

Dia e Hora	Dia 03/06		Dia 04/06		Dia 05 e 06/06											
	Temperaturas Máximas (°C)		Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)		Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)											
Variável	12:30	14:30	15:00	7:00	7:30	14:00	14:30	15:00	1:00	1:30	2:00	12:00	15:00	21:00	22:30	24:00
Ar Externo	17.2	-1.0	17.4	4.0	19.2	19.2	19.2	19.2	4.0	4.0	4.0	16.8 (2.4)	12.5 (-3.3)	12.5 (-3.3)	12.5 (-3.3)	12.5 (-3.3)
Temp. Sup. Ext. - CV -	14.2 (3.0)	3.9 (-4.9)	14.5 (2.9)	7.4 (-3.4)	21.4 (-4.0)	22.9 (-3.7)	22.9 (-3.7)	22.9 (-3.7)	4.8 (-0.8)	4.8 (-0.8)	4.8 (-0.8)	8.32 x 10 ⁶				
Temp. Sup. Ext. - CT -	22.0 (-4.8)	-2.4 (1.4)	21.4 (-4.0)	4.8 (-0.8)	4.8 (-0.8)	4.8 (-0.8)	4.8 (-0.8)	4.8 (-0.8)	4.8 (-0.8)	4.8 (-0.8)	4.8 (-0.8)	8.32 x 10 ⁶				
Radiação solar global diária (J/m ²)	12.80 x 10 ⁶															

COMENTÁRIOS

O gráfico da figura 53 mostra que a temperatura superficial externa apresentou maiores amplitudes diárias na cobertura com terraço, na qual também foram registrados valores extremos absolutos mais elevados. O terraço, comparado à cobertura com vegetação, aquece mais durante o dia, na presença de insolação e esfria mais na madrugada, quando a temperatura do ar externo atinge valores mínimos, estando sujeito, portanto, a maiores variações térmicas. Na cobertura com terraço registraram-se oscilações diárias de 9,3 °C a 24,4 °C, enquanto na cobertura verde, de 4,3 °C a 10,8 °C e no ar externo, de 7,6 °C a 18,4 °C. As diferenças entre os valores extremos das temperaturas do ar externo e as superficiais das duas coberturas, mostradas na tabela 27, confirmam os dados acima, ou seja, na CT as amplitudes são maiores que as do ar externo e, na CV, são menores. Embora o terraço sofra gradientes térmicos diários maiores, as temperaturas superficiais externas médias, durante a semana analisada, em ambas as coberturas são praticamente iguais: 10,5 °C no terraço e 10,4 °C na vegetação. Estes valores são bastante próximos à temperatura média do ar externo, no mesmo período, 10,3 °C.

As curvas de temperaturas superficiais externas mostram, de forma qualitativa, que as mesmas diferem significativamente entre si, conforme os resultados obtidos na análise de variância. Dados da tabela 27 indicam que tal temperatura atingiu valor máximo, em ambas coberturas, no dia 05/06, registrando 22,9 °C, no terraço e 16,8 °C, na vegetação, portanto uma diferença de 6,1 °C. Nos demais dias da semana, esta diferença oscilou entre 1,1 °C e 7,3 °C, sendo que o menor valor foi registrado no dia de menor radiação solar global incidente ($6,99 \times 10^6 \text{ J/m}^2$). Quanto aos valores mínimos, estes ocorreram na madrugada do dia 04/06, na qual foi registrada a mais baixa temperatura do ar externo (-1,0 °C), durante a semana. No terraço, a temperatura atingiu -2,4 °C e na vegetação, 3,9 °C, portanto uma diferença de 6,3 °C. Nas demais madrugadas, as diferenças variaram entre zero e 5,3 °C, verificando-se as maiores diferenças quando a temperatura do ar foi mais baixa.

Em relação ao tempo de ocorrência dos valores extremos, os dados da tabela 27 indicam que os valores mínimos desta temperatura superficial na cobertura com terraço, na maior parte das vezes, ocorreu junto com o da temperatura do ar externo ou meia hora depois. Na cobertura com vegetação, estes extremos ocorreram com diferenças de -0,5 a 1,0 hora. Quanto aos valores máximos, ocorrem com retardo térmico de até 3 horas em ambas as coberturas, registrando-se, na CV, ocorrências de -0,5 horas.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

b) Temperatura superficial na impermeabilização

A figura 54 mostra a evolução das temperaturas superficiais na camada de proteção mecânica da impermeabilização de cada cobertura, durante a semana analisada no período de inverno. A tabela 28 complementa o gráfico anterior, apresentando os valores extremos desta temperatura em as ambas coberturas, bem como a diferença entre elas e o seu horário de ocorrência.

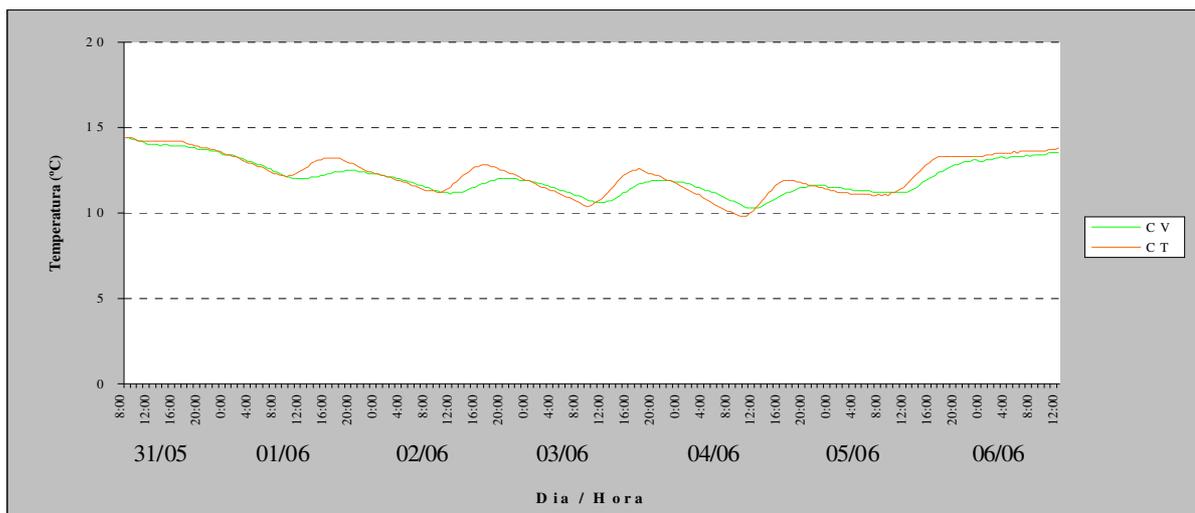


Figura 54 – Gráfico comparativo das temperaturas superficiais na camada de proteção mecânica da impermeabilização de cada cobertura. – Período: 31/05 a 06/06.

Tabela 28 - Valores máximos e mínimos das temperaturas superficiais na camada de proteção mecânica da impermeabilização, em as ambas coberturas - Semana de 31/05 a 06/06/96

Dia e Hora Temp. na Imperm.	Dia 31/05	Dia 01/06				Dia 02/06				Dia 03/06	
	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas (°C)	
		9:30	10:30	15:30	19:00	9:30	11:30	16:30	19:00	9:00	10:30
CV	↓			12.5				12.0			
CT	↓		12.0	13.2 (0.7)			11.1	12.8			10.6
		12.1 (0.1)				11.2 (0.1)		(0.8)		10.4 (-0.2)	

continua...

continuação

Dia e Hora Temp. na Imperm.	Dia 03/06	Dia 04/06				Dia 05/06		Dia 06/06	
	Temperaturas Máximas (°C)	Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)				Temperaturas Mínimas e Máximas (°C)		Temperaturas Mínimas (°C)	
	17:30	19:30	9:30	10:30	16:30	20:30	6:30		
CV		11.9			11.6			↑	
CT	12.6 (0.7)			10.3	11.9 (0.3)			↑	↑
			9.8 (-0.5)				11.0 (-0.2)	↑	↑

COMENTÁRIOS

A figura 54 mostra que, nos períodos de insolação, a temperatura superficial da impermeabilização, na cobertura com terraço, é mais elevada e, nas madrugadas, a temperatura na vegetação é maior. A diferença entre as temperaturas neste nível variou de $-0,7^{\circ}\text{C}$ a $1,2^{\circ}\text{C}$. Em dias de baixa radiação solar (31/05, 05/06 e 06/06), estas diferenças tornaram-se nulas ou mínimas.

O comportamento das curvas de temperaturas confirma, de forma qualitativa, os resultados das análises de variância, ou seja, às 14 horas a diferença entre elas é significativa e às 7 horas, não o é.

O gráfico da figura 54 e a tabela 28 mostram que esta temperatura, na CV, sofre oscilações diárias entre $0,4$ e $1,6^{\circ}\text{C}$, enquanto na CT, as variações são entre $0,9$ e $2,4^{\circ}\text{C}$. Na cobertura com terraço, o maior valor registrado neste nível foi $13,2^{\circ}\text{C}$, e na cobertura verde, $12,5^{\circ}\text{C}$, ambos ocorridos no dia 01/06. Quanto aos valores mínimos, foram registrados: $9,8^{\circ}\text{C}$, na CT e $10,3^{\circ}\text{C}$, na CV. Os valores extremos sempre foram atingidos, primeiramente na cobertura com terraço, com exceção do dia 05/06, em que as mínimas ocorrerem no mesmo instante. O retardo térmico entre a ocorrência de um e outro valor extremo, chegou a 4 horas.

c) Temperatura superficial interna

A evolução das temperaturas superficiais internas, de ambas as coberturas, no período de inverno, é mostrada na figura 55, juntamente com a da temperatura do ar externo. A tabela 29 elucida a figura anterior, apresentando os valores máximos e mínimos de tais temperaturas e os horários de ocorrência dos mesmos.

COMENTÁRIOS

O gráfico mostra que, na maior parte do tempo, a temperatura superficial interna foi maior na cobertura com terraço. A diferença entre as temperaturas das duas coberturas variou, neste período, entre $0,0^{\circ}\text{C}$ e $1,0^{\circ}\text{C}$. Embora sejam valores pequenos, as análises de

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

variância indicaram que são significativos, ao nível de 5%. As menores diferenças entre as curvas ocorreram nos horários em que estas registraram valores mínimos e foram tanto menores, quanto mais baixa foi a temperatura do ar externo, chegando a um valor nulo, no dia 04/06, quando externamente foi registrado $-1,0^{\circ}\text{C}$. As maiores diferenças encontram-se em horários correspondentes aos períodos de insolação.

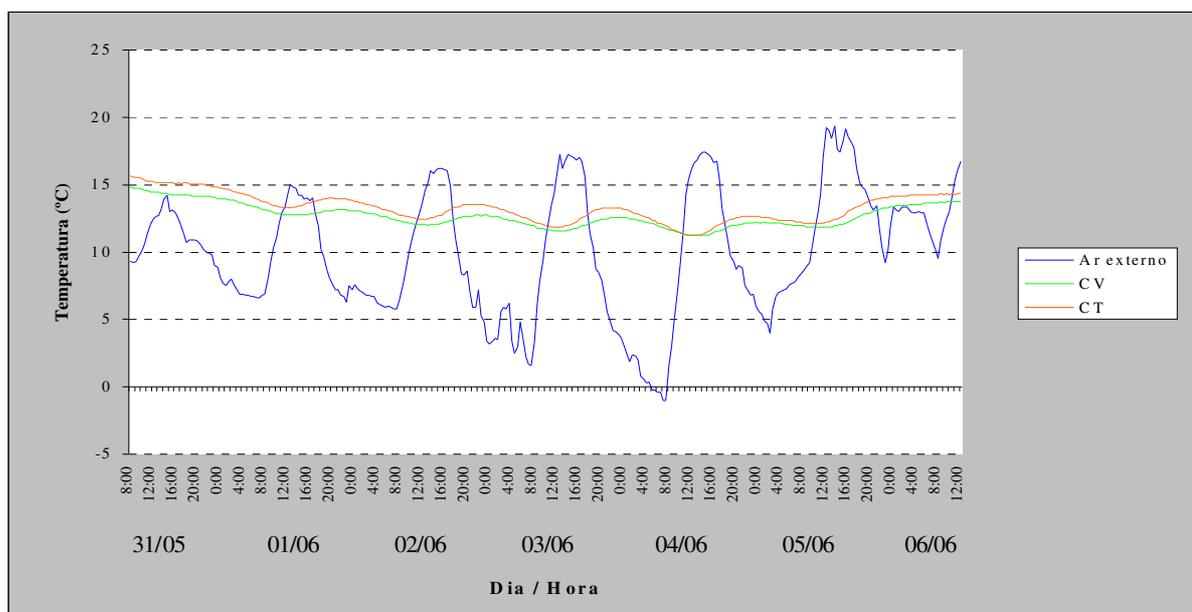


Figura 55 – Gráfico comparativo das temperaturas superficiais internas das duas coberturas, confrontadas com a temperatura do ar externo. Período: 31/05 a 06/06

Os valores extremos da temperatura superficial interna foram: máxima de $14,1^{\circ}\text{C}$ no terraço e $13,2^{\circ}\text{C}$ na vegetação, ambas ocorridas na dia 01/06; mínima de $11,3^{\circ}\text{C}$ no dia 04/06, na cobertura verde e $11,2^{\circ}\text{C}$, no terraço, no mesmo dia. Embora a vegetação apresente um valor mínimo maior que o do terraço, não chega a haver inversão, pois estes extremos não ocorreram na mesma hora.

Quanto às amplitudes diárias, os dados da tabela 29 indicam que a temperatura superficial interna sofre maiores variações na cobertura com terraço. Nesta, tais amplitudes variaram de $0,5$ a $2,0^{\circ}\text{C}$ e, de $0,4$ a $1,3^{\circ}\text{C}$, na cobertura com vegetação.

Em relação ao retardo térmico, verifica-se que a temperatura superficial interna, na maioria das vezes, ocorreu, primeiramente, na cobertura com terraço, com diferenças de até 2,5 horas.

4.2.5.2. Retardo e Amortecimento Térmicos

A partir dos dados de temperaturas superficiais internas e temperatura do ar externo, mostrados na figura 55 e na tabela 29 do item anterior, foram determinados os coeficientes de amortecimento térmico para cada tipo de cobertura, bem como o retardo térmico verificado entre os horários de ocorrência dos valores máximos e mínimos.

Os valores de retardo térmico, ocorridos entre as temperaturas extremas do ar externo e superficial interna variaram, na cobertura verde, de 3,5 a 9,5 horas; enquanto no terraço, de 3,5 e 7,5 horas. Na maioria das vezes (78%), o retardo térmico foi maior na cobertura verde, sendo 11% das vezes iguais e menor nos 11% restantes. A diferença entre os valores de retardo térmico de uma e outra cobertura variou de 0,0 a 2,5 horas.

Quanto à capacidade de amortecimento de cada cobertura, a figura 56 mostra os coeficientes de amortecimento térmico de ambos os fechamentos, calculados em relação aos valores máximos e mínimos das temperaturas do ar externo e superficial interna, no período de inverno.

O gráfico da figura acima indica que os coeficientes de amortecimento térmico da cobertura verde foram menores ou iguais aos da cobertura com terraço. Em 22,2% das vezes, estes valores foram iguais e, na maioria restante (77,8%), menores. Estes coeficientes variaram de 0,01 a 0,15 na cobertura verde e, de 0,01 a 0,20, no terraço. A diferença entre os valores dos coeficientes de amortecimento variou entre 0,00 e 0,06. Assim como no verão os dados indicam que a cobertura com vegetação apresenta maior capacidade de amortecimento e retardo térmicos.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

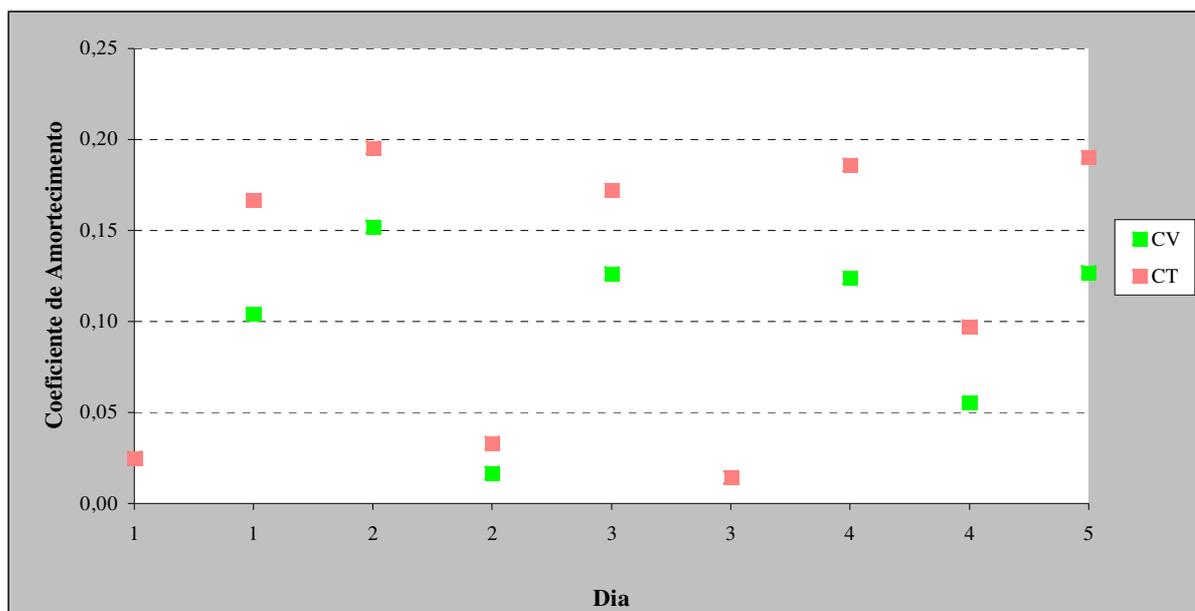


Figura 56 – Gráfico dos coeficientes de amortecimento térmico das coberturas com vegetação e terraço, no período analisado durante o inverno

4.2.5.3. Temperatura do ar interno

A figura 57 mostra o gráfico comparativo das evoluções das temperaturas do ar interno sob as duas coberturas e do ar externo.

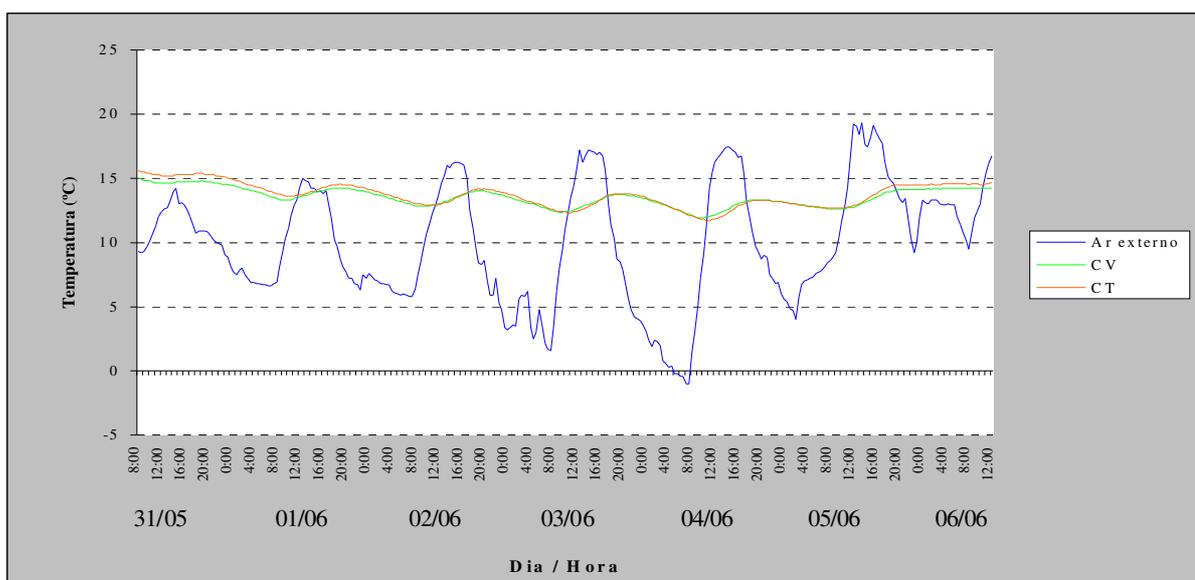


Figura 57 – Gráfico comparativo das temperaturas do ar externo e interno sob as duas coberturas – Período: 31/05 a 06/06

COMENTÁRIOS

O gráfico mostra que são pequenas as diferenças entre as curvas de evolução do ar interno às duas coberturas, o que confirma, qualitativamente, o resultado das análises de variância, informando que tais diferenças não são significativas. Estas variaram entre $0,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, que é pouco, levando-se em conta a incerteza de medição ($\pm 0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$).

A temperatura do ar na câmara sob a cobertura verde manteve-se, a maior parte do tempo, inferior à do terraço, porém, nos picos de frio, nas madrugadas dos dias 2, 3 e 04/06, houve inversão pois, após algumas horas, devido ao retardo térmico, a temperatura do terraço tornou-se menor que a da vegetação. Note-se que no dia 04/06, quando a temperatura do ar externo chegou a atingir valores negativos, esta diferença acentuou-se. Nos dias 31/05, 5 e 6/06, quando as temperaturas externas foram mais elevadas, a diferença entre as curvas aumentou, sendo maior a do terraço.

Embora a temperatura do ar externo tenha sofrido variações diárias de até $18,6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (04/06), as oscilações internas foram muito menores, chegando a $1,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ na cobertura com vegetação e, $2,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ no terraço. Em termos de temperaturas médias, o ar externo registrou o valor mais baixo ($10,3\text{ }^{\circ}\text{C}$), enquanto o terraço, o mais elevado ($13,8\text{ }^{\circ}\text{C}$); a média no interior da câmara sob a cobertura verde foi de $13,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

4.3. ANÁLISE COMPARATIVA DO DESEMPENHO TÉRMICO DAS COBERTURAS NO VERÃO E NO INVERNO

Esta análise é feita comparando-se o comportamento de cada cobertura, nos períodos de verão (08 a 14/01/96 e de 07 a 13/03/96) e de inverno (31/05 a 06/06/96).

4.3.1. *Temperaturas Superficiais*

A tabela 30, a seguir, mostra, de forma resumida e comparativa, os valores extremos das temperaturas superficiais relativos a ambas as coberturas, que foram obtidos no experimento durante as duas estações. Já a tabela 31 apresenta os valores extremos das amplitudes diárias, em cada período, e total de cada temperatura superficial.

4.3.1.1. Temperatura superficial externa

A figura 58, a seguir, registra a evolução das temperaturas superficiais externas, confrontadas com a temperatura do ar externo e com a radiação solar total.

COMENTÁRIOS

Observando-se o gráfico da figura 58 e os dados da tabela 30, nota-se que a cobertura com terraço apresenta temperatura superficial externa, com valores extremos absolutos maiores. Tanto no verão quanto no inverno, no terraço, as temperaturas máximas foram superiores e as mínimas inferiores àquelas registradas na cobertura com vegetação. Os dados indicam que, no verão, o valor máximo dessa temperatura, no terraço, chegou a ser 13,0 °C maior do que aquele registrado na vegetação; no inverno esta diferença foi menor (6,1 °C). Quanto aos valores extremos mínimos, no verão, a diferença entre eles é menor (1,7 °C), aumentando no inverno, quando chegou a um valor de 6,3 °C.

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Tabela 30 – Valores extremos das temperaturas superficiais, em ambas as coberturas, nos períodos de verão e de inverno

Temperaturas (C)	Superficial Externa				Superficial na Impermeabilização				Superficial Interna				
	Máxima		Mínima		Máxima		Mínima		Máxima		Mínima		
	CV	CT	CV	CT	CV	CT	CV	CT	CV	CT	CV	CT	
Período													
Verão	35.9	48.9	19.0	17.3	27.7	29.6	23.3	23.5	27.5	29.3	23.6	23.9	
Inverno	16.8	22.9	3.9	-2.4	12.5	13.2	10.3	9.8	13.2	14.1	11.3	11.2	

Tabela 31 – Amplitudes diárias e total das temperaturas superficiais, em ambas as coberturas, nos períodos de verão e de inverno

Amplitude Diária (C)	Superficial Externa				Superficial na Impermeabilização				Superficial Interna				
	Máxima		Mínima		Máxima		Mínima		Máxima		Mínima		
	CV	CT	CV	CT	CV	CT	CV	CT	CV	CT	CV	CT	
Período													
Verão	14.4	29.3	5.6	6.9	2.9	4.0	0.3	1.5	2.3	2.8	0.1	0.8	
Inverno	10.8	24.4	4.3	9.3	1.6	2.8	0.3	0.9	1.3	2.0	0.4	0.5	
Amplitude total (inverno-verão)	32.0	51.3	-	-	17.7	19.8	-	-	16.2	18.1	-	-	

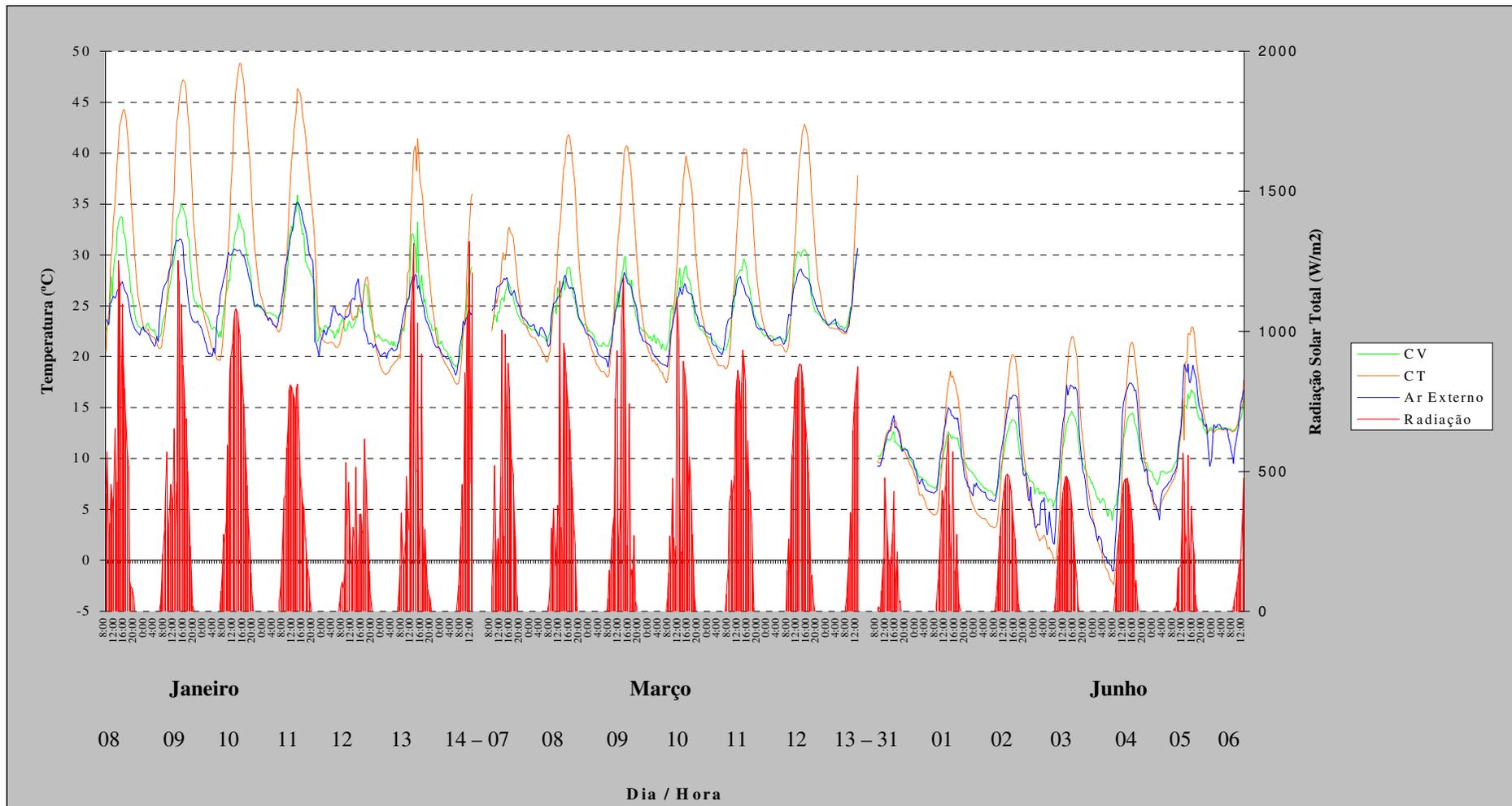


Figura 58 – Gráfico comparativo das temperaturas superficiais externas de ambas as coberturas, confrontadas com a temperatura do ar externo e com a radiação solar total, nos períodos de verão e de inverno

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Tanto no inverno, quanto no verão, a temperatura superficial externa, na cobertura com terraço, apresenta maiores amplitudes diárias que as registradas na cobertura verde. A superfície externa do terraço (lajota), no verão, chegou a sofrer uma variação diária de temperatura de 14,9 °C a mais do que da vegetação. No inverno, esta diferença também é grande, tendo sido registrada até 13,6 °C. As amplitudes totais, considerando todo o período de medição do experimento, nas superfícies externas das coberturas são grandes, tendo-se registrado: 51,3 °C no terraço e, 32,0 °C na vegetação. Estes dados, assim como o gráfico, mostram que o terraço, externamente, aquece e resfria mais que a cobertura com vegetação.

O gráfico da figura 58 mostra que a diferença entre as temperaturas superficiais é maior quando maior a incidência de radiação solar; para radiações solares mais baixas a temperatura superficial no terraço aproxima-se da temperatura do ar externo. Na vegetação, a temperatura superficial externa acompanha, de certa forma, a do ar externo, sendo maior em janeiro, muito próxima em março e menor no inverno. Este gráfico mostra, ainda que as curvas representativas da temperatura superficial de ambas as coberturas confirmam, de forma qualitativa, a significância das diferenças entre elas, apontada nas análises de variância, em qualquer período analisado.

4.3.1.2. Temperatura superficial na impermeabilização

O gráfico comparativo da evolução da temperatura superficial na camada de proteção mecânica da impermeabilização é mostrado na figura 59, a seguir.

COMENTÁRIOS

Ao nível da camada de proteção mecânica da impermeabilização, as oscilações externas são nitidamente percebidas e as diferenças verificadas no nível superficial externo mantêm-se, porém, bastante atenuadas, verificando-se maior redução nos dados da cobertura com terraço (até 19,8 °C, no verão e até 12,2 °C, no inverno contra, respectivamente, 9,9 °C e 6,4 °C, na CV). Isto se deve ao fato de ter sido adotado, para a disposição da camada impermeabilizante desta cobertura, o sistema U.S.D. - up side down - em que a impermeabilização fica termicamente protegida. Assim, o comportamento das temperaturas superficiais neste nível das duas coberturas são semelhantes devido à quantidade de isolamento térmico empregado e à posição relativa deste isolamento quanto à impermeabilização.

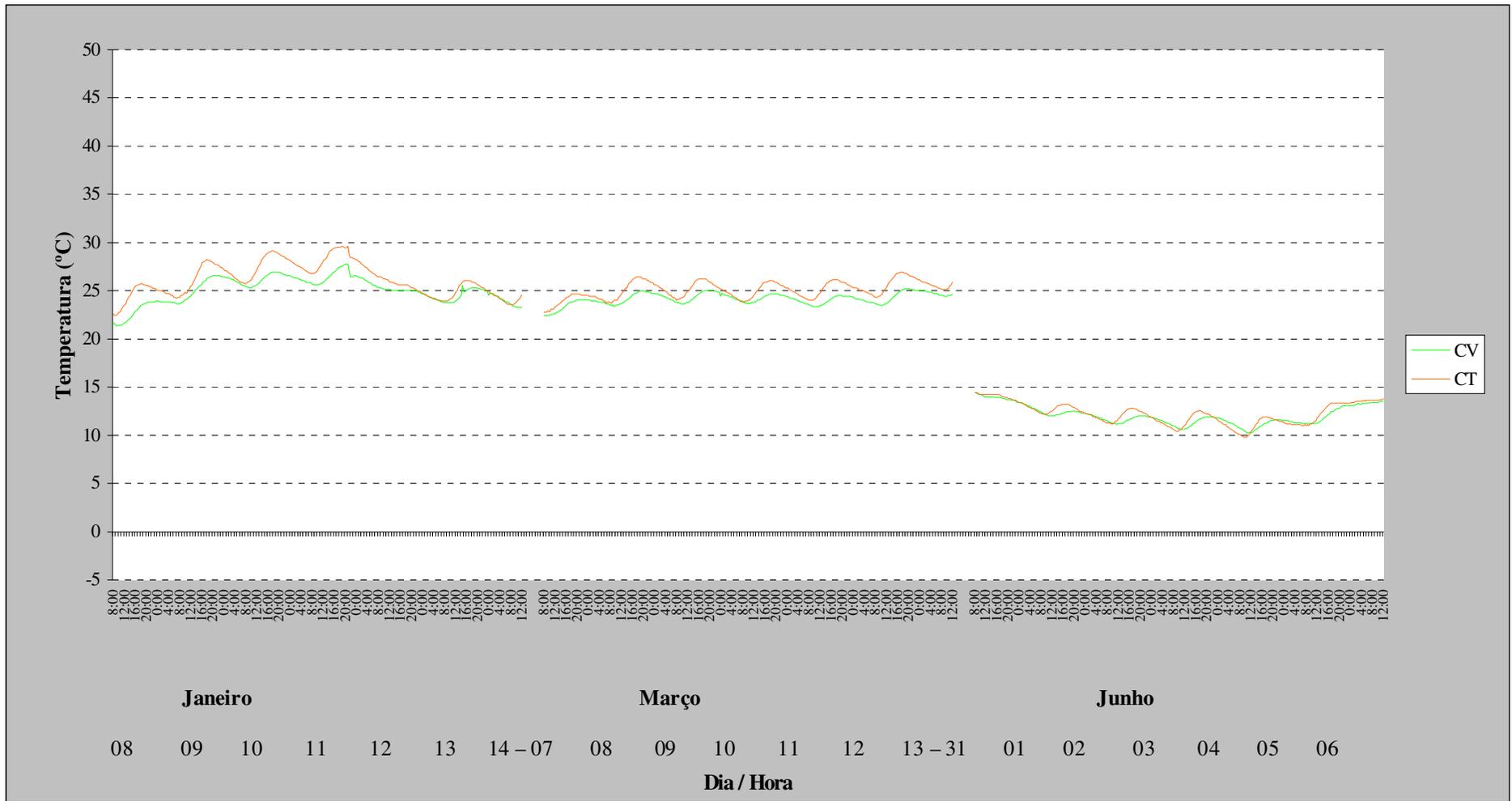


Figura 59 – Gráfico comparativo da evolução das temperaturas superficiais na camada de proteção mecânica da impermeabilização de ambas as coberturas, nos períodos de verão e de inverno

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Neste nível, no verão, a temperatura superficial registrada no terraço foi sempre superior àquela da cobertura verde, ocorrendo diferenças maiores quando a temperatura do ar externo e a radiação solar são mais elevadas. No inverno, também a temperatura do terraço mantém-se superior, a maior parte do tempo; no entanto, nos períodos de frio mais intenso, a temperatura na cobertura com vegetação torna-se mais elevada.

Em termos de amplitude de variação da temperatura superficial neste nível, também o terraço é a cobertura que sofre maiores oscilações, tanto numa estação quanto na outra. Isto é válido para as amplitudes diárias, assim como para a amplitude total ao longo de todo o período de medição do experimento, registrando-se, no terraço, uma variação de 19,8 °C e 17,4 °C na vegetação.

As variações externas são percebidas no nível da impermeabilização, com retardo térmico que chegaram, no verão, até 9,5 horas na cobertura verde e, até 6 horas, no terraço. No inverno, este retardo foi menor, atingindo até 6,5 horas na CV e, até 5 horas na CT.

4.3.1.3. Temperatura superficial interna

As temperaturas superficiais internas de ambas as coberturas têm sua evolução, ao longo dos três períodos analisados, mostrada no gráfico da figura 60.

COMENTÁRIOS

O gráfico da figura 60 deixa claro que a temperatura superficial interna na cobertura com terraço foi sempre superior à da cobertura com vegetação, em todos os períodos analisados, no inverno e no verão. A diferença entre estas temperaturas tornou-se muito pequena, quase nula, quando a temperatura do ar diminuiu muito.

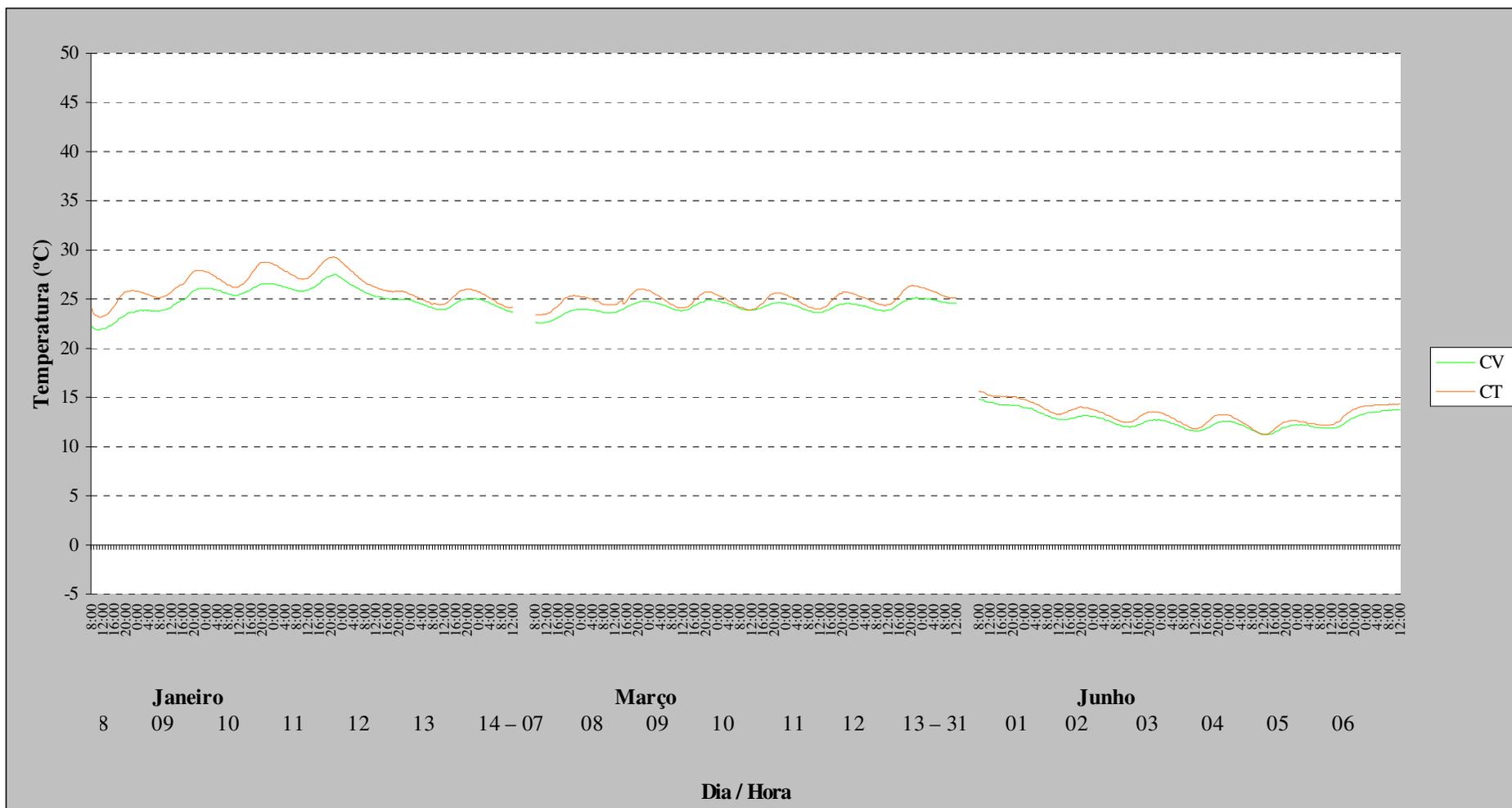


Figura 60 – Gráfico comparativo da evolução das temperaturas superficiais internas de ambas as coberturas, nos períodos de verão e de inverno

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

Neste nível, também a cobertura com terraço sofreu maiores variações diárias da temperatura superficial. Entre as duas estações do ano analisadas, no terraço esta temperatura esteve sujeita a uma oscilação de 18,1 °C, enquanto, na cobertura verde, a oscilação máxima foi de 16,2 °C.

As variações ocorridas na superfície externa manifestaram-se, na superfície interna, com retardo térmico de até 11 horas na CV e, de até 9 horas, na CT, no verão; no inverno este retardo foi menor, porém continuou sendo maior na cobertura verde (até 8,5 horas contra 6,5 horas no terraço). Quanto ao amortecimento verificado, estes são maiores na cobertura com terraço, chegando a atingir 20,2 °C no verão e 19,2 °C no inverno, enquanto, na cobertura verde, os amortecimentos foram, respectivamente, de 9,9 °C e 7,4 °C.

4.3.2. Retardo e Amortecimento Térmicos

A análise do retardo e amortecimento térmicos nos períodos de verão e inverno é feita de acordo os dados apresentados nos itens 4.1.5.2 e 4.2.5.2. Para a determinação de tais parâmetros foram considerados os valores extremos da temperatura do ar externo e das temperaturas superficiais internas de cada cobertura. O comportamento entre as coberturas é semelhante nas duas estações; ou seja, na maioria das vezes, o retardo térmico na cobertura verde é maior ou igual àqueles verificados no terraço.

Os valores de retardo térmico verificados entre o momento de ocorrência entre as temperaturas extremas do ar externo e a superficial interna correspondente, variaram, no período de verão, de 2,5 a 10,5 horas na CV e, de 2,0 a 8,5 horas, na CT. No inverno, estes valores oscilaram, na cobertura verde, entre 3,5 e 9,5 horas, e no terraço, entre 3,5 e 7,5 horas.

Os coeficientes de amortecimento térmico de ambas as coberturas, calculados em relação aos valores máximos e mínimos das temperaturas do ar externo e superficial interna correspondente, indicam que, tanto no verão, quanto no inverno, a cobertura verde, na maioria das vezes, é a que apresenta maior capacidade de amortecimento. Na CV, este coeficiente variou de 0,03 a 0,42, no verão e, de 0,01 a 0,15, no inverno; no terraço, esta variação foi, respectivamente de 0,00 a 0,51 e, de 0,01 a 0,20. Estes dados mostram que há uma tendência à redução do coeficiente no período de inverno, em ambas as coberturas.

4.3.3. Temperatura do Ar Interno

A figura 61, a seguir, evidencia a evolução das temperaturas do ar externo e interno, nas câmaras sob as coberturas, nos períodos de verão e de inverno. A tabela 32 apresenta, resumidamente, os valores extremos da temperatura do ar interno, em ambas as coberturas, nos períodos de verão e de inverno, enquanto a tabela 33 mostra as amplitudes diárias e total sofrida por esta variável.

Tabela 32 – Valores máximos e mínimos da temperatura do ar interno, em ambas as coberturas, nos períodos de verão e de inverno

Variável Período	Temperatura do ar interno (°C)			
	Máxima		Mínima	
	CV	CT	CV	CT
<i>Verão</i>	27,8	28,7	23,2	23,6
<i>Inverno</i>	14,8	15,4	11,9	11,7

Tabela 33 – Amplitudes diárias e total da temperatura do ar interno, em ambas as coberturas, nos períodos de verão e de inverno

Amplitude Diária Período	Temperatura do ar interno (°C)			
	Máxima		Mínima	
	CV	CT	CV	CT
<i>Verão</i>	2,9	2,2	0,2	0,5
<i>Inverno</i>	1,8	2,1	0,7	0,6
<i>Amplitude total (verão-inverno)</i>	15,9	17,0	-	-

COMENTÁRIOS

O gráfico da figura 61 mostra que, no verão, a temperatura interna da câmara da cobertura com vegetação, manteve-se sempre inferior à temperatura do terraço e que, nos dias de maior variação externa, a diferença entre elas também foi maior (em torno de 1,2 °C), tornando-se mínima (em torno de 0,5 °C), quando a variação da temperatura externa foi menor, associada a uma baixa radiação global diária.

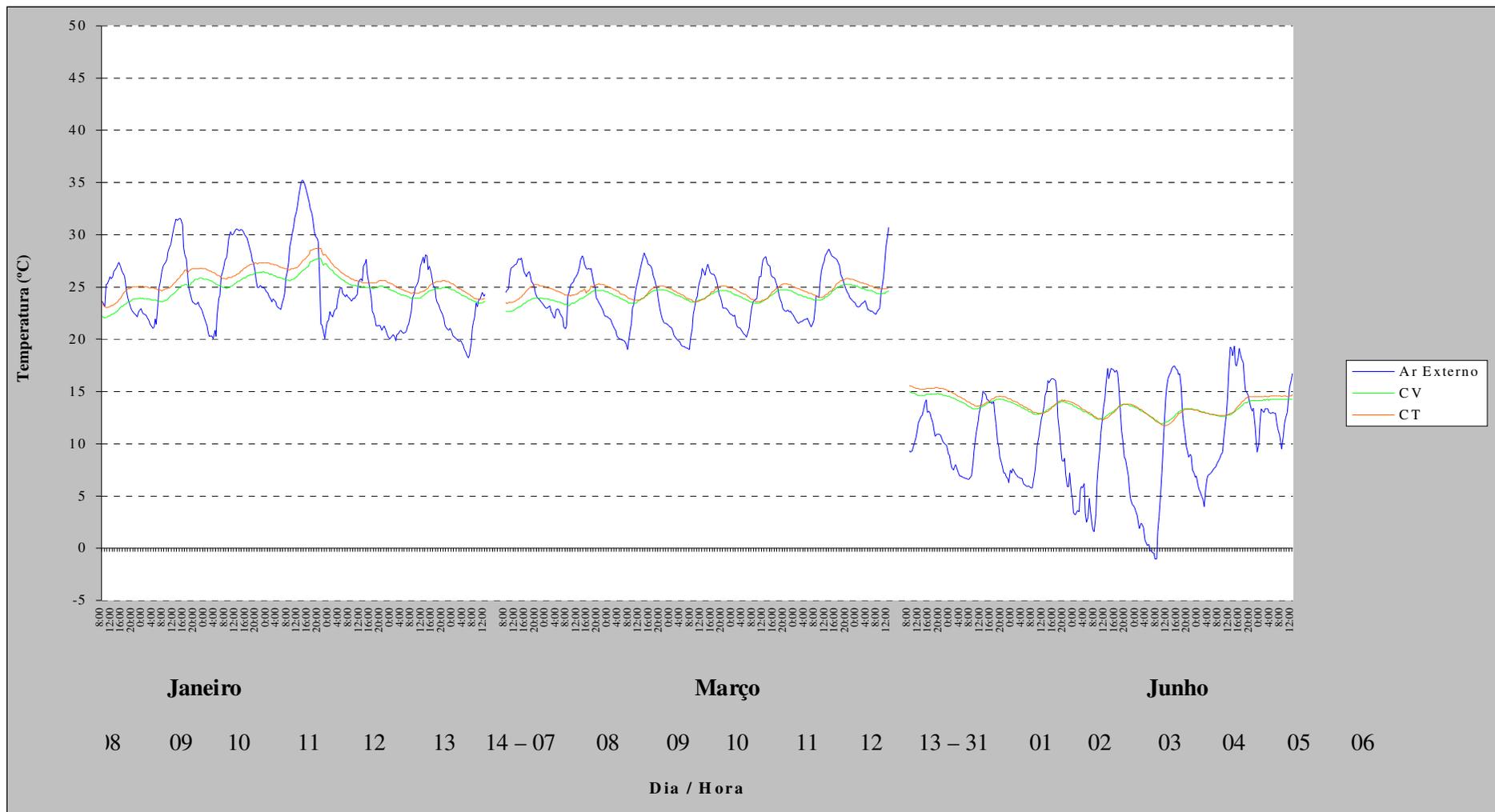


Figura 61 – Gráfico comparativo das temperaturas do ar externo e interno sob as duas coberturas, nos períodos de verão e de inverno

4 – Resultados Obtidos e Análise dos Dados

No inverno, a temperatura interna referente à cobertura verde manteve-se, na maior parte do tempo, também inferior à temperatura do terraço, porém nos dias em que a temperatura externa diminuiu, atingindo valores muito baixos ou negativos, houve inversão e a temperatura do ar interno sob a cobertura com vegetação tornou-se superior.

Conforme os dados da tabela 33, ao longo de todo o período de medições do experimento (verão-inverno), a temperatura do ar interno, na câmara sob a cobertura com terraço, sofreu variação maior que a da cobertura verde; no entanto, no período de verão, é na CV que as amplitudes diárias desta variável são maiores.

5. CONCLUSÕES

Neste capítulo são mostradas as principais conclusões obtidas na montagem do experimento e nas análises realizadas. Estas conclusões são arroladas, obedecendo à mesma ordem adotada nos capítulos anteriores, não expressando, portanto, ordem de importância relativa.

São apresentadas, também, conclusões gerais do trabalho e sugestões para desenvolvimentos futuros.

5.1. PRINCIPAIS CONCLUSÕES

5.1.1. *Da montagem experimental:*

- A montagem de uma bancada experimental - envolvendo desde o projeto até a construção e finalização da bancada, além da obtenção, manutenção, calibração e instalação dos sensores e equipamentos - é um trabalho bastante demorado, em função dos vários imprevistos que surgem, e que exige paciência e dedicação.
- A dificuldade de obtenção de recursos e a escassez dos mesmos torna a montagem experimental uma verdadeira conquista, que só é possível com a ajuda e a boa-vontade de várias pessoas, às vezes não diretamente envolvidas na questão.
- A realização de um período de medições preliminares é de fundamental importância para a avaliação da montagem feita, possibilitando alterações nos procedimentos experimentais, de forma a garantir dados satisfatórios.

5.1.2. Da análise do desempenho térmico de verão:

- Neste período foi confirmada a hipótese de fluxo de calor unidimensional nas coberturas, uma vez que as diferenças entre as medidas de temperatura, obtidas nas posições central e lateral (próximo ao apoio) na laje, não se apresentaram significativas.
- As diferenças entre as temperaturas superficiais de uma e outra cobertura, nos três níveis analisados, são, estatisticamente, significativas: os maiores valores destas diferenças foram: 15,7 °C, 2,6 °C e 2,4 °C, respectivamente, nos níveis externo, da impermeabilização e interno.
- As temperaturas superficiais registradas na cobertura com terraço, nos três níveis considerados, estiveram sujeitas a maiores amplitudes de variação diária do que aquelas verificadas na vegetação.
- O terraço, externamente, aqueceu e resfriou mais do que a cobertura com vegetação, chegando a temperatura superficial externa a atingir, 48,9 °C, enquanto, na vegetação, o máximo foi 35,9 °C.
- As temperaturas superficiais interna e no nível da impermeabilização, registradas na cobertura com terraço, mantiveram-se superior ou igual às da cobertura com vegetação, mesmo tendo sofrido maiores amplitudes diárias.
- Os coeficientes de amortecimento térmico indicam que a cobertura verde é o fechamento que apresenta maior capacidade de amortecimento da variação externa de temperatura. Na cobertura verde, tais coeficientes variaram entre 0,03 e 0,42, no terraço, de 0,00 a 0,51. A diferença entre eles oscilou de -0,31 a 0,23, sendo, na maioria das vezes (68%), menor na vegetação.
- Os maiores retardos térmicos, ocorridos entre as temperaturas extremas do ar externo e superficial interna, verificaram-se na cobertura verde, variando de 2,5 a 10,5 horas; no terraço, oscilaram entre 2,0 e 8,5 horas. A diferença entre eles variou de 0,0 a 3,0 horas., sendo maior na cobertura com vegetação, em 64 % das vezes.
- A temperatura do ar interno na câmara sob o terraço manteve-se superior ou igual à da cobertura com vegetação, tendo a diferença entre elas chegado a 1,5 °C.
- A diferença entre as temperaturas do ar e a de globo indicam que, na cobertura verde, não havia efeito de radiação no interior da câmara; já no terraço, indicam que este efeito existiu durante a semana de janeiro e, em março, não.

5.1.3. Da análise de desempenho térmico de inverno:

- A hipótese de fluxo de calor unidimensional nas lajes das coberturas não foi totalmente confirmada, pois as diferenças de temperaturas, registradas nas posições central e lateral de cada laje, apresentaram-se não significativas somente para as medições do nível externo.

- As coberturas verde e com terraço apresentaram comportamento diferente entre si, quando consideradas as diferenças entre as temperaturas superficiais registradas nos três níveis monitorados. As maiores diferenças verificadas nos níveis externo, da impermeabilização e interno foram, respectivamente: 7,5 °C, 1,2 °C e 1,0 °C.

- As temperaturas superficiais registradas na cobertura com terraço, nos três níveis considerados, estão sujeitas a maiores amplitudes de variação diária do que às da cobertura com vegetação.

- Nos níveis externo e na camada de proteção mecânica da impermeabilização, o terraço é a cobertura que mais esfria e mais aquece. No caso, a temperatura superficial externa variou de -2,4 °C a 22,9 °C, enquanto na vegetação, de 3,9 °C a 16,8 °C; no nível da impermeabilização, as oscilações foram, respectivamente: de 9,8 °C a 13,2 °C, e de 10,3 °C a 12,5 °C.

- No nível superficial interno, embora o terraço tenha sofrido maiores oscilações diárias, a temperatura desta cobertura manteve-se sempre igual ou superior àquela registrada na cobertura verde.

- Os coeficientes de amortecimento térmico indicam que a cobertura verde é o fechamento que apresenta maior capacidade de amortecimento da variação externa de temperatura do ar. Na cobertura verde, tais coeficientes variaram entre 0,01 e 0,15, no terraço, de 0,01 a 0,20. A diferença entre eles oscilou de 0,00 a 0,06, sendo, na maioria das vezes (77,8%), menor na vegetação.

- Os maiores retardos térmicos, ocorridos entre as temperaturas extremas do ar externo e superficial interna verificaram-se na cobertura verde, variando de 3,5 a 9,5 horas; no terraço, oscilaram entre 3,5 e 7,5 horas. A diferença entre eles variou de 0,0 a 2,5 horas., sendo maior na cobertura com vegetação, em 78 % das vezes.

- A temperatura do ar na câmara, sob a cobertura verde, manteve-se, na maior parte do tempo, inferior à do terraço, porém tornou-se superior nos picos de frio. A diferença entre estas temperaturas variou de -0,7 °C a 0,3 °C.

- As diferenças entre as temperaturas do ar e de globo indicam que houve efeito de radiação, somente no interior da câmara da cobertura com terraço.

5.1.4. Da análise comparativa do desempenho térmico das coberturas no verão e no inverno:

- Nas duas estações, as coberturas verde e com terraço apresentaram comportamentos diferentes entre si, em relação às diferenças de temperaturas superficiais registradas nos três níveis monitorados de uma e outra cobertura.

- O terraço foi a cobertura que registrou maiores amplitudes de variação diária e total das temperaturas superficiais, obtidas nos três níveis analisados. As maiores amplitudes totais (considerando os períodos de medição) nos níveis externo, da impermeabilização e interno da cobertura com terraço foram, respectivamente: 51,3 °C, 19,8 °C e 18,1 °C, enquanto, na cobertura verde, 32,0 °C, 17,7 °C e 16,2 °C. Logo, os materiais constituintes da cobertura com terraço, em todos os níveis, estão sujeitos a maiores variações térmicas que os da cobertura com vegetação.

- O terraço, externamente, aqueceu e esfriou mais do que a cobertura verde, tanto no verão quanto no inverno.

- Considerando as medições no nível da camada de proteção mecânica da impermeabilização, a relação entre as temperaturas superficiais das coberturas apresentaram comportamentos distintos, conforme a estação. No verão, a temperatura registrada no terraço manteve-se superior ou igual à da cobertura com vegetação, enquanto, no inverno, foi ora superior, ora inferior.

- No nível interno das lajes, a relação entre as temperaturas superficiais apresentaram comportamento idêntico no verão e no inverno, isto é, a temperatura registrada no terraço manteve-se superior ou igual à da cobertura verde, mesmo tendo sofrido maiores amplitudes diárias.

- Tanto no verão quanto no inverno, os coeficientes de amortecimento térmico indicam que a cobertura verde foi o fechamento que apresentou maior capacidade de amortecer a onda térmica externa, além de registrar maiores retardos térmicos.

- As temperaturas do ar interno nas câmaras sob as coberturas apresentam comportamentos diferentes, conforme a estação. No verão, a temperatura registrada no terraço manteve-se sempre superior ou igual à da cobertura verde; porém, no inverno, nos picos de frio, a temperatura da cobertura com vegetação tornou-se superior.

- Para analisar, de forma mais precisa, as possíveis trocas de calor por radiação no interior das câmaras sob as coberturas, seria imprescindível o monitoramento das temperaturas superficiais nas paredes e nos pisos e/ou o fluxo de calor através de cada uma das coberturas.

5.2. CONCLUSÕES GERAIS

O trabalho teve como objetivo inicial o estudo comparativo, a partir de dados experimentais, do comportamento térmico de coberturas planas com vegetação e terraço, em condições climáticas de verão e inverno. A construção e o monitoramento de uma bancada experimental possibilitaram obter os dados pretendidos e, por conseguinte, a realização da análise comparativa do desempenho térmico das coberturas em estudo, atingindo, assim, a principal meta prevista no projeto.

Como trabalho experimental, apresentou uma série de dificuldades e imprevistos e, portanto, atraso em relação aos prazos iniciais previstos no projeto, mas os resultados finais constituem uma contribuição ao estudo do desempenho térmico de coberturas planas com vegetação ou com terraço.

Houve grande diferença entre as temperaturas superficiais externas, embora as coberturas tenham estado sujeitas às mesmas condições climáticas, em relação a quantidade de energia solar incidente, ou à temperatura do ar externo ou, ainda à velocidade do vento registradas. Isto se deve às propriedades térmicas dos respectivos materiais de acabamento (piso /grama). A evapotranspiração é um dos fatores importantes que influi no balanço energético da cobertura verde, diferenciando-o do terraço. Além disto, a vegetação tem a capacidade de transformar, por seu metabolismo, parte da energia solar incidente em energia química durante o dia, e liberar calor à noite. Por conseqüência, conforme mostraram os dados obtidos no experimento, suas temperaturas superficiais diurnas são inferiores àsquelas da cobertura com terraço, enquanto as noturnas são superiores, sofrendo portanto, menores oscilações térmicas.

Entre as camadas constituintes de uma cobertura plana, a impermeabilização é de fundamental importância, estando sua vida útil diretamente ligada ao gradiente térmico a que esteja submetida. Quanto maiores as oscilações térmicas a que estão sujeitas as mantas asfálticas impermeabilizantes, mais cedo fissuram e deixam de cumprir seu papel. Da mesma

5 - Conclusões

forma, os esforços gerados pela variação térmica nas lajes de cobertura é uma das principais causas de patologias. Assim, a presença de isolamento térmico é essencial nas coberturas planas.

Na cobertura verde, suas próprias camadas constituintes (vegetação, substrato, camada drenante) exercem o papel de isolante térmico, minimizando as variações térmicas, tanto na impermeabilização como na laje. É imprescindível o uso de isolamento térmico em terraços, onde são registradas grandes oscilações e elevadas temperaturas na superfície externa.

No experimento, o uso de grande quantidade de isolamento térmico e sua posição, em relação à impermeabilização (sistema *up side down*), fizeram com que as temperaturas superficiais no terraço, registradas nos níveis da impermeabilização e superficial interno, se tornassem próximas àquelas medidas na cobertura verde nestes níveis, embora, externamente, tenham se verificado grandes diferenças.

O estudo mostrou que existe diferença entre o desempenho térmico das coberturas analisadas. A cobertura verde apresentou melhor resposta, nas condições de verão e comportamento térmico semelhante ao terraço em condições climáticas de inverno. Afora isto, todos os seus materiais constituintes sofreram menores variações de temperatura; e, mais, os coeficientes de amortecimento térmico revelaram que esta tem maior capacidade de amortecer a onda térmica externa, além de apresentar maior retardo térmico.

No Brasil, cujo território, está sujeito, em sua maior parte, a elevadas temperaturas e intensa e abundante insolação durante quase todo o ano, as coberturas verdes podem ser uma solução adequada contra aos efeitos da radiação solar, uma vez que se apresentam como um fechamento com boa capacidade de isolamento e inércia térmicos. Para locais de clima frio, mais rigoroso do que aqueles registrados no sul do nosso país, este tipo de cobertura também deverá apresentar melhor resposta térmica e ser uma boa solução, conforme indicam os dados obtidos nas madrugadas frias ocorridas durante o experimento, além de seu uso, já consagrado, em países europeus.

Por tudo isto, a cobertura verde é uma alternativa viável para coberturas planas, que pode proporcionar um espaço diferenciado de lazer e contemplação, além de funcionar como bom isolamento térmico e garantir desempenho térmico adequado.

5.3. DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Como sugestão para futuros estudos a serem desenvolvidos na linha de pesquisa sobre coberturas planas alternativas, e de acordo com a natureza do trabalho a ser proposto, podem ser indicados os seguintes temas:

- Estudos experimentais:
 - Monitoramento e avaliação do desempenho térmico de outros exemplares de coberturas verdes, tais como: a) com menores espessuras de solo e mesmo tipo de vegetação; b) com outros tipos de substrato e outras espécies vegetais, c) várias combinações possíveis entre si.
 - Emprego de plantas aquáticas é também uma alternativa a ser estudada, por apresentar grande potencial estético e paisagístico.
- Estudos teóricos:
 - Determinação do modelo matemático que descreve as trocas de calor nos tipos de coberturas analisadas.
 - Simulação computacional do desempenho térmico de coberturas verdes. Dados obtidos experimentalmente, podem servir para validar tais sistemas.
 - Estudo do aumento percentual do custo da estrutura necessária em diferentes tipos de coberturas verdes.
 - Estudo comparativo da relação custo/benefício, avaliando-se diferentes tipos de coberturas verdes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **ASHRAE Handbook: Fundamentals**, Atlanta, 1981. p. 23.12-23.32
2. APPL, Roland, ZINK, Rainer. Ein Zwanzigjähriges Kiesdach Wird Zum Gründach. **Beratende Ingenieure**, Berlin, Springer-Verlag, p. 26-30, jan./feb. 1994.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto e execução de obras de concreto armado -NBR 6118**. Rio de Janeiro, 1980.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Cargas para o cálculo de estruturas de edificações - NBR 6120**. Rio de Janeiro, 1980.
5. BASF BRASILEIRA. **Isofoam**. São Paulo,1993. Dados técnicos do fabricante.
6. BECKER, Maria de Fátima M. **Análise de Desempenho Térmico de uma Habitação Unifamiliar Térrea**. Porto Alegre, 1992. 87p.Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
7. BOLETIM AGROCLIMATOLÓGICO. Pelotas: Estação Agroclimatológica de Pelotas – Convênio EMBRAPA/UFPel/INMET, jan. 1996.
8. BOLETIM AGROCLIMATOLÓGICO. Pelotas: Estação Agroclimatológica de Pelotas – Convênio EMBRAPA/UFPel/INMET, mar. 1996.
9. BOLETIM AGROCLIMATOLÓGICO. Pelotas: Estação Agroclimatológica de Pelotas – Convênio EMBRAPA/UFPel/INMET, maio 1996.
10. BOLETIM AGROCLIMATOLÓGICO. Pelotas: Estação Agroclimatológica de Pelotas – Convênio EMBRAPA/UFPel/INMET, jun. 1996.
11. COSTA, Ennio Cruz da. **Arquitetura Ecológica - Condicionamento Térmico Natural**. São Paulo: Edgard Blücher, 1982.
12. CREUS SOLÉ, Antonio. Transductores de Temperatura. In: POBLET, José M. **Transductores y Medidores Electrónicos**. 2. ed. Barcelona: Marcombo Boixareu, 1983. p. 115-127. (Mundo Electrónico)

13. DAL MOLIN, Denise C. Coitinho. **Fissuras em Estruturas de Concreto Armado - Análise das Manifestações Típicas e Levantamento de Casos Ocorridos no Estado do Rio grande do Sul.** Porto Alegre, 1988. 220p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
14. ECI - Equipamentos Científicos e Industriais. **Manual do Data-Logger ECI.** 13p.
15. EMBRAPA – Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solos.** 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro, 1997.
16. FARIA, Rogério Teixeira de. **Tensiômetro: construção, instalação e utilização; um aparelho simples para se determinar quando irrigar.** Londrina: IAPAR, 1987.
17. FROTA, Anésia Barros; SCHIFFER, Sueli Ramos. **Manual de Conforto Térmico.** São Paulo: Nobel, 1988. 228p.
18. GRUB, H. **Ajardinamientos Urbanos.** Barcelona: Gustavo Gili, 1986. Vegetación en Fachadas y Cubiertas, p. 118-148.
19. HARAZONO, Yoshinobu et al. Effects of Rooftop Vegetation using Artificial Substrates on the Urban Climate and the Thermal Load of Buildings. **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 15, n. 3-4, p 435-442, 1990/91.
20. HONJO, Tsuyoshi; TAKAKURA, Tadashi. Simulation of Thermal Effects of Urban Green Areas on their Surrounding Areas. **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 15, n. 3-4, p 443-446, 1990/91.
21. HOYANO, Akira, **Effects of Rooftop Turf-planting Layers upon Building Thermal Environment.** Fukuoka, Japan: Memoirs of the Faculty Engineering - Kyushu University, v. 44, n. 2, p. 135-148, 1984.
22. HOYANO, Akira. Climatological Uses of Plants for Solar Control and the Effects on the Thermal Environment of a Building. **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 11, p. 181-199, 1988.
23. INCROPERA, F.; WITT, D. **Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa.** 3. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 1992.
24. JOHNSTON, Jacklyn; NEWTON, John. **Building Green – A Guide to Using on Roofs, Walls and Pavements.** London: The London Ecology Unit, 1991.

25. KAWASHIMA, S. Effect of Vegetation on Surface Temperature in Urban and Suburban Areas in Winter. **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 15, n. 3-4, p 465-469, 1990/91.
26. KROLKIEWICZ, Hans Jürgen. Gärten auf den Dächern. **Bauzeitung**. Berlin, v. 46, p. 538-542, 1992.
27. LAMBERTS, Roberto. **Desempenho Térmico de Coberturas Leves com Ático: Bancada de Testes e Modelo Matemático**. Porto Alegre, 1983. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
28. MATSUBARA, Naoki; NAKASE, Isao; HORIKOSHI, Tetsumi. Traditional Landscapes in Japan with Regard to Climatic, Geographical, and Hydrological Environment. **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 15, n. 3-4, p 471-478, 1990/91.
29. MEIER, Alan K. Strategic Landscaping and Air-conditioning Savings: A Literature Review. **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 15, n. 3-4, p 479-486, 1990/91.
30. MINKE, Gernot. Ecological Architecture: a Demand. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE IN HOUSING – PLEA 86, Pécs - Hungary, 1986. Proceedings... v. 2, p. I-1 -- I-14.
31. MORGADO, José Miguel. Coberturas Verdes. **Impermeabilizar**, São Paulo, n. 78, p. 62-76, fev. 1995.
32. NÃÃS, Irenilza de Alencar. **Princípios de Conforto Térmico na Produção Animal**. São Paulo: Ícone, 1989. 183p.
33. NIMER, E. **Climatologia do Brasil**. 2. ed. Rio de Janeiro: IBGE, 1989. 421p.
34. NORMAIS CLIMATOLÓGICAS - 1961-1990. Pelotas: Estação Agroclimatológica de Pelotas – Convênio EMBRAPA/UFPe/INMET.
35. OMETTO, José Carlos. **Bioclimatologia Vegetal**. São Paulo: Ed. Agronômica Ceres, 1981. 425p.
36. PICCHI, Flávio Augusto. Impermeabilização de Coberturas – Panorama Geral e Perspectivas. In: **TECNOLOGIA DAS EDIFICAÇÕES**. São Paulo: IPT/Pini, 1986. p.245-250.
37. PICCHI, Flávio Augusto. **Impermeabilização de Coberturas**. São Paulo: Pini, 1986. 216p.

38. PIRONDI, Z. **Manual Prático da Impermeabilização e de Isolação Térmica**. São Paulo: SBR – Editora e Artes Gráficas, 1988. 140p.
39. REICHARDT, Klaus. **Processos de Transferência no Sistema Solo- Planta- Atmosfera**. 4. ed. rev. e ampliada. Campinas: Fundação Cargil, 1985. Cap. 6: A água em equilíbrio, p. 98-155.
40. REICHARDT, Klaus. **A Água em Sistemas Agrícolas**. São Paulo: Manole, 1987. Balanço Hídrico, p. 113-125.
41. RHODIA-STER. **Bidim – Catálogo de Aplicações**. São Paulo, 1995
42. RIVERO, Roberto. **Arquitetura e Clima – Acondicionamento Térmico Natural**. 2. ed. Porto Alegre: D. C. Luzzatto, 1986.
43. SAITO, Ikuo; ISHIHARA, Osamu; KATAYAMA, Tadahisa. Study of the Effect of Green Areas on the Thermal Environment in an Urban Area. **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 15, n. 3-4, p 493-498, 1990/91.
44. SAITO, Katsuo; WADA, Sadaji. **Trees and Stones – Secrets of Japanese Gardening**. 2. ed. Tokyo: Japan Publications Trading Company, 1965. Cap. 3: The Rooftop Garden, p. 174-176.
45. TANDY, Cliff et al. **Manual de Paisaje Urbano**. Madrid: H. Blume, 1976. Cap. 42: Jardines sobre Cubiertas de Edificios, p. 334–344.
46. TIWARI, G. N.; UPADHYAY, M.; RAI, S. N. A Comparison of Passive Cooling Techniques. **Building and Environment**, v. 29, n. 1, p. 21-31, 1994.
47. VERÇOZA, Ênio José. **Patologia das Edificações**. Porto Alegre: D. C. Luzzatto, 1991. 173p.
48. WALL, Maria. **Thermal performance of the courtyard and surrounding residential buildings**. Measurements and calculations. Stockholm: Swedish Council for Building Research, 1992.
49. WILMERS, Fritz. Green for Melioration of Urban Climate. . **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 11, n. 1-3, p 289-299, 1988.
50. WILMERS, Fritz. Effects of Vegetation on Urban Climate and Buildings. **Energy and Buildings**, Lausanne, v. 15, n. 3-4, p 507-514, 1990/91.

- 51. ZANESCO, I. Análise e Construção de um Piranômetro Fotovoltaico.** Porto Alegre, 1991. 120p. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.