

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

CAROLINE SANTANA DE MORAIS

**DESEMPENHO TÉRMICO DE COBERTURAS VEGETAIS EM
EDIFICAÇÕES NA CIDADE DE SÃO CARLOS - SP**

**SÃO CARLOS-SP
2004**

CAROLINE SANTANA DE MORAIS

**DESEMPENHO TÉRMICO DE COBERTURAS VEGETAIS EM
EDIFICAÇÕES NA CIDADE DE SÃO CARLOS - SP**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Mestre em Construção Civil.

Área de concentração:
Sistemas Construtivos de Edificações

Orientação: Prof. Dr. Maurício Roriz

São Carlos-SP
2004

**Ficha catalográfica elaborada pelo DePT da
Biblioteca Comunitária da UFSCar**

M827dt

Morais, Caroline Santana de
Desempenho térmico de coberturas vegetais em
edificações na cidade de São Carlos-SP / Caroline Santana
de Moraes. -- São Carlos : UFSCar, 2004.
106 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São
Carlos, 2004.

1. Arquitetura e conservação de energia. 2. Cobertura
verde. 3. Desempenho térmico. 4. Conforto ambiental. I.
Título.

CDD: 721.04672 (20^a)

Com amor e carinho, aos meus pais,
Fernando e Elizete, e às minhas irmãs, Maria
Augusta e Fernanda, **DEDICO.**

Agradecimentos

A Deus, por me conceder saúde, fé e disposição para alcançar meus objetivos.

Aos meus pais, por tudo, minha eterna gratidão.

Ao Prof. Dr. Maurício Roriz, do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, pela orientação, confiança, ensinamentos e, sobretudo, pelo exemplo e estímulo com que se dedica à pesquisa e ao desenvolvimento científico.

A Jerônimo pelo amor, carinho, paciência e contribuições sempre bem-vindos.

Às amigas, Valéria Teles e Gianna Barbirato, pelo entusiasmo com que acreditam e acompanham minhas conquistas.

Aos colegas do curso, pelo companheirismo, em especial, Marcus Campos.

A todos do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de São Carlos, particularmente às pessoas que fazem o Programa de Pós-Graduação em Construção Civil, em especial, Cecília, pelo total apoio.

A todos do Escritório de Desenvolvimento Físico e à Prof^a. Dr^a. Odete Rocha do Departamento de Ecologia e Biologia Evolutiva, ambos da Universidade Federal de São Carlos, pela liberação de uso da edificação utilizada para construção do experimento.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo-FAPESP, pela concessão da bolsa de mestrado (n. 02/09977-2) durante o último ano de curso e pelo apoio financeiro para a realização desta pesquisa.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico-CNPq, por financiar a compra dos aparelhos registradores de dados, utilizados neste trabalho.

Ao Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada-CRHEA, do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, pela liberação de sua base de dados e permissão de uso.

E aos demais que, de alguma forma, contribuíram para a elaboração desta dissertação.

Resumo

MORAIS, C. S. de. **Desempenho térmico de coberturas vegetais em edificações na cidade de São Carlos-SP**. 2004. 106 f. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

As vantagens das coberturas verdes têm sido objeto de estudo de vários pesquisadores em diferentes países, pois as mesmas podem contribuir positivamente para a melhora do clima nas cidades e do desempenho térmico dos edifícios, tanto no verão quanto no inverno. Este trabalho tem como objetivo geral avaliar, experimentalmente, o comportamento térmico de uma cobertura verde, em protótipo, submetida ao clima da região de São Carlos, em situação de inverno e de verão. Para tanto, foram monitoradas as lajes de coberturas com e sem vegetação, a fim de se obter dados de seus desempenhos térmicos. Para monitorar dados de temperaturas e umidades relativas do ar e temperaturas superficiais das faces internas das lajes, o material utilizado foi um sistema eletrônico de aquisição de dados. Por meio do programa Jardim 1.0, foram estimadas as temperaturas superficiais externas da laje sem vegetação e das folhas da camada de vegetação da cobertura verde. Os dados de irradiância solar global e velocidade do vento, necessários à estimativa dessas temperaturas superficiais externas, foram fornecidos pela estação climatológica da Escola de Engenharia de São Carlos. As análises foram ordenadas de modo a comparar os desempenhos térmicos das coberturas em cada uma das situações, separadamente, e entre uma situação e outra. No inverno a cobertura verde apresentou uma amplitude térmica média 70% menor que a da cobertura sem vegetação. No verão, entre as temperaturas do ar nos ambientes internos às coberturas ocorreram diferenças de até 5°C. Os valores obtidos mediante as comparações indicaram um desempenho mais satisfatório da cobertura verde, a qual se manteve mais estável e resistente às flutuações térmicas diárias, tanto no inverno quanto no verão. Estes resultados indicaram que a cobertura ajardinada dispõe de importante potencial de aplicação no clima considerado, sendo solução de custo relativamente baixo e podendo contribuir efetivamente para melhorar o conforto ambiental e a eficiência energética do ambiente construído.

Palavras-chave: cobertura verde, desempenho térmico, conforto ambiental

Abstract

MORAIS, C. S. de. **Thermal performance of planted roofs in buildings in the city of São Carlos-SP**. 2004 106 p. Dissertation (Master). Civil Engineering Department, Federal University of São Carlos, São Carlos, 2004.

Planted roofs, known as green roofs as well, can positively contribute to the improvement of buildings thermal performance and cities climate. The advantages of the planted roofs have been object of study of several researchers along different countries. However, some quantitative data on this subject are still needed in the context of tropical climate. The aim of this work is to evaluate the thermal performance of a planted roof and how it influences the thermal protection of the building, in accordance with São Carlos climatic conditions. The investigations were implemented for not only winter, but summer too. During both periods, air relative humidity, surface and air temperature measurements were taken at the indoor and the outdoor environment of the building prototype. Moreover, a comparison between a bare roof and of a green roof was made, using the same building prototype. The outdoor surface temperature for the bare roof and the leaves, which cover the green roof, was estimated through a Jardim 1.0 computational program. Data of global solar irradiance and wind velocity, necessary to estimate the outdoor surface temperatures, were achieved through a weather station. The analysis were ordered according to the thermal performances of the roofs in each one of the situations, separately, and between one and other situation. By field measurements, during the winter and the summer, smaller thermal amplitudes were noticed for the green roof. In the winter, the green roof presented medium thermal amplitude 70% smaller than the bare roof. During the summer, the amount of heat coming into the building prototype was reduced by the green roof. These and other results indicate the major green roof capacity of reducing daily temperature variations and thermal ranges. It has been confirmed that planted roofs effectively contribute to improve the thermal benefits being both, cost and energy effective, for the buildings and their surrounding environment.

Keywords: planted roof, thermal performance, environmental comfort

Sumário

Agradecimentos	iv
Resumo	v
Abstract	vi
Sumário	vii
1 Introdução	9
2 Revisão da Literatura	13
2.1 Vegetação e ambiente construído.....	13
2.2 Histórico das coberturas verdes.....	15
2.3 Definição de coberturas verdes.....	18
2.4 Detalhes construtivos e elementos de projeto	20
2.5 Manutenção de coberturas verdes.....	22
2.6 Custos	23
2.7 Benefícios qualitativos e quantitativos das coberturas verdes.....	24
2.7.1 Melhora da qualidade do ar	24
2.7.2 Alterações climáticas e microclimáticas.....	25
2.7.3 Controle da temperatura	25
2.7.4 Isolamento térmico.....	27
2.8 Outros benefícios das coberturas verdes.....	29
2.9 Dificuldades de implantação e difusão das coberturas verdes	31
2.10 Desempenho térmico de coberturas verdes	31
2.10.1 Cálculo do fluxo de calor em uma cobertura comum.....	32
2.10.2 Cálculo da resistência térmica em uma cobertura verde.....	33
2.10.3 Cálculo da condutividade térmica equivalente em cobertura verde.....	34
2.10.4 Amplitude, amortecimento e atraso térmicos.....	35
2.11 O Processo de Evapotranspiração (PE)	36
2.12 O método de Penman - Monteith	38
3 Material e Métodos	41
3.1 Identificação e análise das edificações	41
3.2 O protótipo.....	42
3.2.1 Localização	42
3.2.2 Descrição do protótipo	43
3.3 Material utilizado nos monitoramentos.....	49
3.4 Jardim 1.0 – Temperaturas Superficiais em Vegetação.....	51

3.4.1	Dados de entrada – valores medidos	52
3.5	Medições	52
3.5.1	Medições de inverno	53
3.5.2	Medições de verão.....	54
3.6	Tratamento estatístico dos dados	56
4	Resultados e Discussão	59
4.1	Desempenho térmico de inverno	59
4.1.1	Dados climáticos	60
4.1.2	Dados do protótipo: Laje Comum -LC.....	62
4.1.3	Dados do protótipo: Cobertura Verde – CV	64
4.1.4	Comparação entre laje comum e cobertura verde: LC x CV	67
4.2	Desempenho térmico de verão	73
4.2.1	Dados climáticos	73
4.2.2	Dados do protótipo: Laje Comum - LC.....	75
4.2.3	Dados do protótipo: Cobertura Verde – CV	78
4.2.4	Comparação entre laje comum e cobertura verde: LC x CV	80
4.3	Comparação dos desempenhos térmicos das coberturas no inverno e no verão: LC x CV (inverno) X (verão) LC x CV	86
4.3.1	Temperaturas do ar.....	86
4.3.2	Temperaturas superficiais internas	88
4.3.3	Temperaturas superficiais externas (estimativas).....	90
5	Conclusões	92
5.1	Do desempenho térmico de inverno	92
5.2	Do desempenho térmico de verão	93
5.3	Da análise dos desempenhos térmicos de inverno e de verão.....	94
5.4	Sugestões para pesquisas futuras	95
	Referências	96
	Anexo A	101
	Anexo B	102
	Anexo C	103
	Anexo D	104
	Anexo E	106

1 Introdução

Nas densas áreas urbanas, a grande concentração de edificações, parques industriais, adensamento populacional e pavimentação, associados ao acúmulo de poluentes causam sérios impactos ambientais como a redução dos espaços verdes entre áreas construídas.

As superfícies verdes tornam-se indispensáveis para amenizar situações de desconforto e o desperdício de energia com a climatização de edifícios. Sendo assim, os planejadores enfrentam o desafio de buscar outros meios para a melhoria da qualidade de vida nos centros urbanos, tentando aumentar a quantidade de suas áreas verdes e melhorar o bem estar de seus ocupantes.

O projeto de uma edificação deve considerar parâmetros que proporcionem uma construção segura, adequada ao uso, durável, econômica e confortável. Mas, por uma certa dificuldade em harmonizar todos esses objetivos, as decisões de projeto tornam-se, freqüentemente, insatisfatórias.

O nível de conforto oferecido por um ambiente depende de condições higrotérmicas, antropodinâmicas e acústicas, de conforto visual e tátil e da pureza do ar. Quanto ao conforto higrotérmico, um fator importante é o das trocas térmicas realizadas por meio das vedações entre o ambiente interno e o exterior.

Ao projetista cabe controlar essas trocas térmicas que atuam sobre os elementos e componentes de vedação. Sua possibilidade de ação sobre as parcelas convectivas, em geral, é limitada, pois dependem muito da incidência do vento. Assim, resta como alternativa a atuação sobre a condução e a radiação. Em uma cobertura, constituída de telhado e forro, as trocas de calor entre o ambiente interno e externo ocorrem como ilustrado na Figura 1.1 e na Figura 1.2.

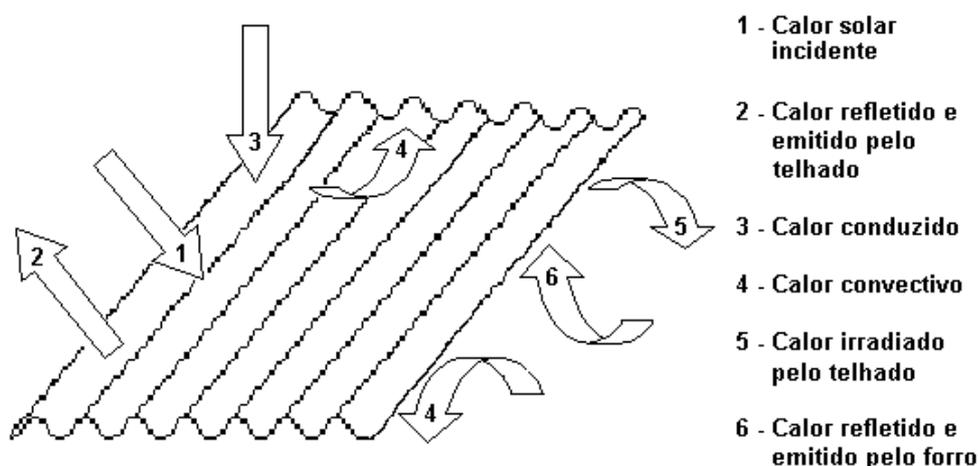


Figura 1.1: Trocas de calor em um telhado

Fonte: VITTORINO; SATO; AKUTSU, 2003.

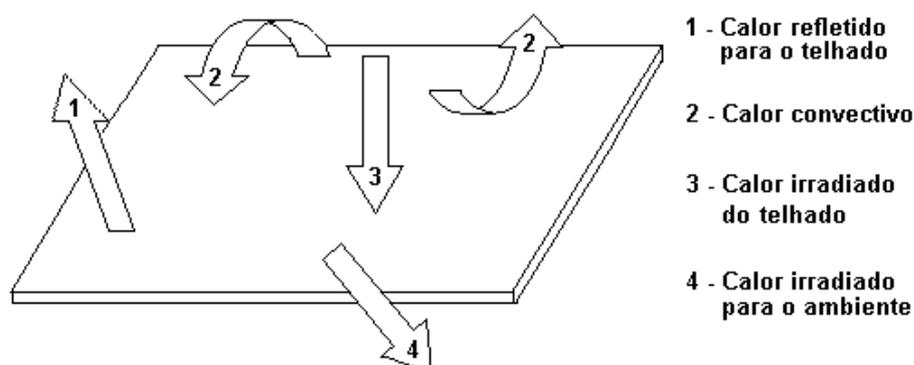


Figura 1.2: Trocas de calor em um forro

Fonte: VITTORINO; SATO; AKUTSU, 2003.

O projeto térmico dos edifícios depende, principalmente, das circunstâncias internas requeridas, das condições climáticas externas e da escolha dos materiais de construção. Na Arábia Saudita, Al-Sanea (2002), constatou que em regiões tanto de clima quente, quanto de clima frio, o uso de isolantes térmicos e de tipos especiais de materiais de construção aumentou significativamente nos últimos anos. Isto se deve a uma crescente busca pelo conforto térmico dos usuários de edifícios residenciais, comerciais e institucionais, aumentando os custos com energia.

A influência da radiação solar sobre a estrutura dos edifícios, principalmente daqueles sem proteção térmica, pode ser muito grave. A cobertura, em particular, por ser um dos componentes que mais está exposto aos raios solares, é a responsável por grande

parcela do fluxo de calor transferido ao ambiente interno. Tal componente sofre as variações térmicas diárias e anuais, atingindo altas temperaturas durante o dia, devido à insolação direta e, à noite, perde calor em virtude do rápido resfriamento ocasionado pelas trocas por radiação de onda longa com o céu.

O Brasil possui quase que a totalidade de seu território sujeita a intensa e abundante insolação durante a maior parte do ano. Por este motivo, a cobertura deveria ser o elemento com maior proteção térmica, particularmente em edificações com poucos pavimentos. Neste sentido, uma opção considerável é a adequação da cobertura dos edifícios.

Muitos sistemas de coberturas são desenvolvidos para minimizar os fluxos energéticos entre interior e exterior (MACHADO; BRITTO; NEILA, 1999). A vegetação aplicada à cobertura pode protegê-la da radiação solar direta, assim como resfriá-la, por intermédio do efeito de refrigeração evaporativa (DEL BARRIO, 1998). Em países de clima quente e úmido, como é o caso de boa parte do território brasileiro, esse efeito pode ser aproveitado para reduzir o calor que penetra nos ambientes internos.

As coberturas com vegetação, também conhecidas como “coberturas verdes”, que variam desde um simples gramado a um sofisticado jardim, podem constituir alternativas viáveis, devido às inúmeras vantagens que oferecem quanto a aspectos de ordem técnica, econômica, estética e psicológica, proporcionando significativo potencial a ser explorado. Como vantagem técnica, cita-se o desempenho térmico, objeto da referida pesquisa.

Apesar de não ser idéia nova, uma vez que os primeiros jardins em coberturas foram executados há milhares de anos, a cobertura com vegetação tem respondido com eficiência aos requisitos de estabilidade, resistência mecânica, segurança contra incêndio, proteção contra ruído, economia de energia e proteção térmica. Com vantagens comprovadas em relação a outros tipos de coberturas.

Diante de preocupações como melhorar a qualidade de vida dos indivíduos, preservar o meio ambiente e divulgar práticas ecologicamente conscientes, com o intuito de promover cada vez mais o desenvolvimento sustentável, países como Canadá, Estados Unidos, Alemanha e outros, têm exercido significativa influência na promoção e difusão do uso das coberturas verdes.

Este trabalho tem como objetivo geral avaliar, teórica e experimentalmente, o comportamento térmico de uma cobertura verde, em protótipo, submetida ao clima da cidade de São Carlos, em situação de inverno e de verão. Para tanto, foram monitoradas

lajes de coberturas com e sem vegetação, a fim de se obter dados de seus desempenhos térmicos.

Como objetivos específicos, além de obter dados sobre os desempenhos térmicos das coberturas enfocadas, o trabalho procura identificar as variáveis climáticas de maior interferência no comportamento dos sistemas de cobertura analisados; comparar as temperaturas resultantes de diferentes sistemas de coberturas; caracterizar tecnicamente as coberturas analisadas e seus efeitos sobre as temperaturas internas; bem como contribuir para o desenvolvimento tecnológico da construção civil.

Os dados obtidos foram analisados comparativamente, tomando-se como base os sistemas construtivos das coberturas, assim como suas contribuições como protetores térmicos. A referida pesquisa pretende, ainda, auxiliar a difusão da cobertura verde como um eficiente sistema construtivo.

O presente trabalho compreende além deste, mais quatro capítulos. No segundo capítulo, Revisão da Literatura, são apresentados, além de histórico e definições, detalhes de projeto, manutenção e aplicações das coberturas verdes, seus benefícios quantitativos e qualitativos, suas desvantagens e as dificuldades em sua difusão. No terceiro capítulo, Material e Métodos, são definidas as características experimentais da pesquisa, assim como os procedimentos e equipamentos utilizados. No quarto capítulo, Resultados e Discussão, são apresentados os dados e análises comparativas de desempenho relativo a temperaturas superficiais e do ar, para situação de inverno e de verão, em coberturas com funções semelhantes. O quinto capítulo, Conclusões, apresenta uma síntese das análises conclusivas e sugestões para pesquisas futuras.

Este trabalho não tem o propósito de esgotar o tema Coberturas Verdes, mas apenas contribuir com seu estudo.

2 Revisão da Literatura

Este capítulo apresenta os resultados de algumas publicações científicas sobre o assunto coberturas verdes. Além disso, são feitas considerações acerca da importância da vegetação no ambiente construído, de um breve histórico, da definição, dos detalhes construtivos e elementos de projeto, da manutenção, dos custos e dos benefícios qualitativos e quantitativos. Visto que a cobertura verde é pouco divulgada e utilizada em nosso país, este item aborda, também, as dificuldades relativas à sua difusão e implantação.

Com relação aos cálculos relativos ao desempenho térmico das coberturas verdes, tema do trabalho, os mesmos foram tratados de acordo com os estudos mais recentes realizados por alguns autores de diferentes países.

2.1 Vegetação e ambiente construído

Frente a um modelo de urbanização que sobrecarrega a cidade e despovo o campo, tanto em países desenvolvidos quanto naqueles em desenvolvimento, projetos alternativos baseados na sustentabilidade e na reabilitação ecológica impõem-se de modo a evitar o consumo excessivo dos recursos naturais, reduzir custos com energia e produção de resíduos, os quais o meio ambiente não absorve naturalmente.

Recuperar e restaurar o meio também pressupõe restaurar edifícios e reabilitar espaços a novas funções, conservando a memória urbana (CORREA; GONZÁLEZ, 2002). De acordo com Rivero (1985, p. 87), a vegetação é um elemento rico em possibilidades, capaz de complementar harmoniosamente recursos como forma e orientação dos edifícios, além dos dispositivos e elementos arquitetônicos fixos ou móveis, que têm como finalidade

principal o controle da radiação solar, procurando eliminá-la no verão e aproveitá-la no inverno.

Segundo Romero (2000), a vegetação contribui de forma significativa para o estabelecimento de microclimas. O próprio processo de fotossíntese auxilia na umidificação do ar, por meio do vapor d'água que libera. Ao umidificar o ar, a vegetação provoca "resfriamento evaporativo", processo resultante da evaporação da água da vegetação no ar, que diminui a temperatura e aumenta a umidade do mesmo.

Em dias quentes de verão, a vegetação atua como um refrigerador evaporativo natural, diminuindo as altas temperaturas (AKBARI, 2002). As principais funções das áreas verdes urbanas são: amenizar climas mais quentes por intermédio do sombreamento; amortecer diferenças bruscas de temperatura; refletir e filtrar as radiações emitidas pelo sol e pelas superfícies próximas, refrescando os ambientes e reduzindo os efeitos urbanos de "ilha de calor".

Em geral, a vegetação tende a estabilizar os efeitos do clima de seu entorno, reduzindo os extremos das variáveis ambientais. Além de auxiliar na diminuição da temperatura do ar, a vegetação absorve energia e favorece a manutenção do ciclo oxigênio-gás carbônico, essencial à renovação do ar (DIMOUDI; NIKOLOPOULOU, 2003).

De acordo com Givoni (1976, p. 145), a cobertura é o componente do edifício mais exposto aos elementos climáticos. O impacto da radiação solar em dias claros de verão, as perdas de calor por radiação de ondas longas durante a noite e chuvas e neve no inverno, afetam a cobertura mais que a qualquer outra parte do edifício. A depender de sua cor externa e de seu sistema construtivo, a superfície externa da cobertura, freqüentemente, está sujeita a grandes variações de temperatura. Sob condições de calor, a temperatura interna é afetada pela cobertura. Em países de clima quente, a cobertura é a principal fonte de aquecimento de edifícios térreos ou de pouco pavimentos.

Os impactos térmicos das coberturas com vegetação têm sido objeto de estudo de muitos pesquisadores. Alguns dados quantitativos foram obtidos recentemente por meio de medições de campo ou simulações computacionais.

Acerca do desempenho térmico dos elementos de cobertura de edifícios, Al-Sanea (2002), utilizando um modelo numérico, avaliou seis tipos de coberturas usuais na Arábia Saudita. Os resultados mostraram que, como esperado, a fonte dominante do ganho de

energia pela cobertura era a radiação solar absorvida. De modo geral, a contribuição da troca de calor por radiação foi duas vezes maior que por convecção.

Segundo Velazquez (2002), a comparação do desempenho térmico entre uma cobertura verde e uma tradicional pode ser obtida por meio de medições do fluxo de energia nos dois sistemas de cobertura, a fim de compreender seu funcionamento e examinar os perfis de temperatura de cada cobertura, considerando temperatura do ar, temperatura de superfície, radiação solar, velocidade e sentido do vento e umidade relativa.

Nos centros urbanos, superfícies verdes são indispensáveis na prevenção de situações de desconforto, de gastos energéticos com a climatização de edifícios e do efeito urbano de “ilha de calor”. Devido à especulação, as áreas verdes estão tornando-se cada vez mais escassas. Contudo, acrescentar vegetação nas superfícies de coberturas comuns tem sido uma opção eficiente no combate ao total desaparecimento dos espaços verdes urbanos (NIACHOU, 2001).

Na cidade, a cobertura com vegetação não tem somente função ornamental. Atua, também, como um filtro contra a poluição e como reguladora da umidade, por meio dos processos de evapotranspiração (GOMEZ, 1998).

A vegetação, estrategicamente utilizada em coberturas, é uma solução natural considerada como um complemento ecológico aos poucos espaços verdes das selvas de concreto das cidades, além de contribuir para o benefício térmico dos edifícios e seus entornos (WONG, 2003a).

Do ponto de vista térmico, os benefícios das coberturas com vegetação são inquestionáveis, pois oferecem proteção ao edifício reduzindo sua carga térmica, além de contribuir para a melhora dos microclimas. Os impactos térmicos das coberturas verdes têm sido objeto de estudo de muitos pesquisadores (WONG, 2003a).

2.2 Histórico das coberturas verdes

As coberturas verdes não são um fenômeno recente. Há milhares de anos, em muitos países, elas vêm sendo consideradas uma prática construtiva comum. Isto se deve, principalmente, à excelente qualidade isolante da camada combinada entre solo e vegetação. Em climas frios elas ajudam a reter calor no interior do edifício e, em climas quentes, impedem sua penetração (PECK, 1999).

De acordo com Osmundson (1999, p.112), a primeira referência histórica de jardins suspensos, feitos pelo homem, são os zigurates da antiga Mesopotâmia, atual região do Iraque, construídos por volta de 600 a.C. O mais famoso deles, Etemenanki, na Babilônia, tinha 91m de altura e uma base de 91x91m (ETEMENANKI:..., 2004). O mais preservado dos antigos zigurates é o de Nanna, na antiga cidade de Ur (Figura 2.1).

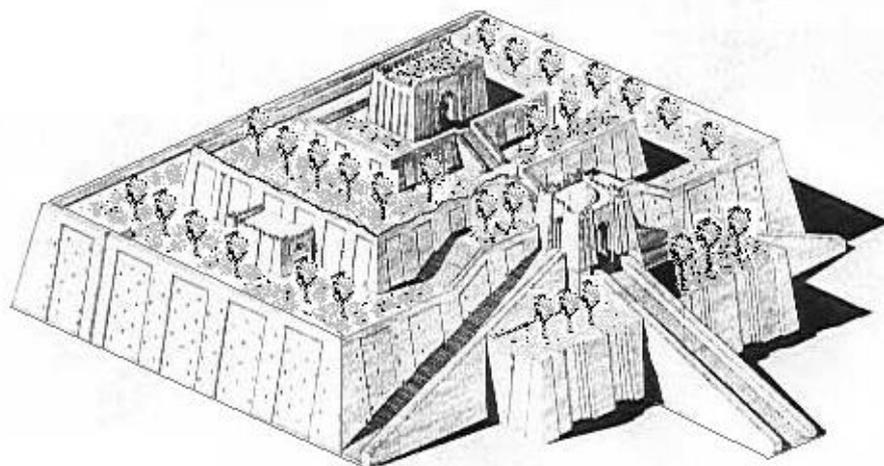


Figura 2.1: Zigurate de Nanna, antiga cidade de Ur (2113 a.C.)

Fonte: ZIGURATE, 2003.

Outros primeiros exemplos de coberturas verdes puderam ser vistos, também, nos Jardins Suspensos da Babilônia, em 450 a.C. (Figura 2.2 e Figura 2.3), provavelmente o mais famoso jardim sobre cobertura de todos os tempos (OSMUNDSON, 1999, p.113).

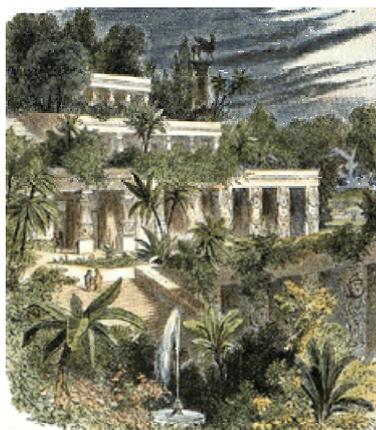


Figura 2.2: Jardins Suspensos da Babilônia, Mesopotâmia (450 a. C.)

Fonte: JARDINSUS, 2002.

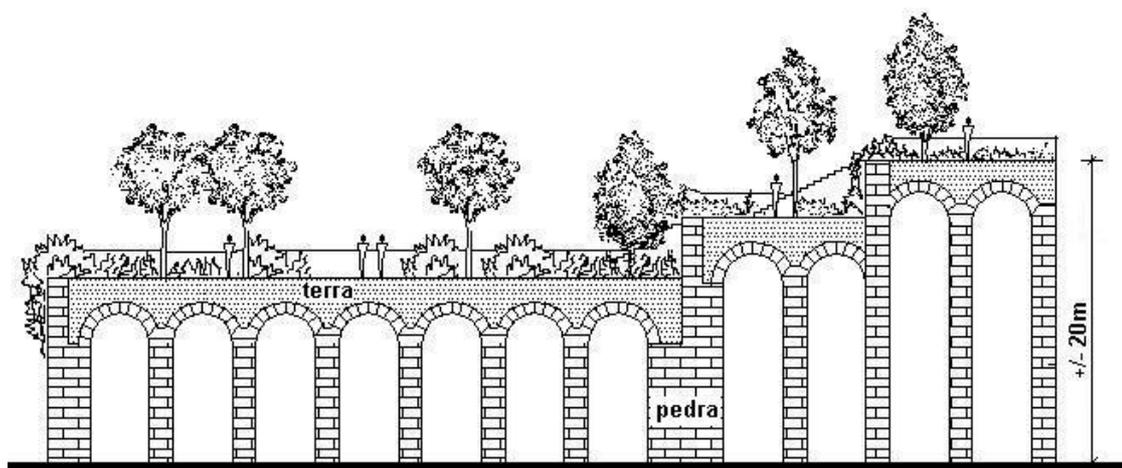


Figura 2.3: Desenho de seção dos Jardins Suspensos da Babilônia

Fonte: OSMUNDSON, 1999, p.113.

Durante o Império Romano, em Pompéia, sul da Itália, era comum o crescimento de plantas trepadeiras em cima de varandas. Os romanos também utilizavam árvores na cobertura de seus edifícios como os mausoléus de Augusto e Adriano. Os vikings empregavam nas paredes e nas coberturas de suas casas camadas de gramado para se protegerem das chuvas e dos ventos e, às vezes, usavam algas marinhas para isolar a cobertura (PECK, 1999).

Durante o período renascentista, tetos com vegetação eram comuns na cidade de Gênova, Itália. No período pré-colombiano, também existiam no México. Nos séculos XVI e XVII, a Índia e algumas cidades espanholas já tinham seus exemplos de coberturas com vegetação. A partir do século XVIII começaram a surgir em algumas cidades francesas (DE LORME, 1996). A Figura 2.4 mostra alguns exemplos na Escandinávia, início do século XIX.



Figura 2.4: Escandinávia, século XIX

Fonte: HISTORY, 2002.

Na arquitetura moderna contemporânea, o uso de vegetação em lajes de cobertura está diretamente associado a dois dos mais famosos arquitetos da época, Le Corbusier e Frank Lloyd Wright (CURTIS, 1986).

Até metade do século XX, a prática construtiva das coberturas verdes era considerada por muitos como popular ou vernacular. Em países do norte da Europa, como Alemanha, Áustria e Escandinávia, o conceito de telhado verde já é amplamente difundido devido ao antigo interesse desses países em combater a degradação ambiental e a rápida devastação dos espaços verdes das áreas intensamente desenvolvidas.

No início dos anos 60, foram desenvolvidas e melhoradas muitas tecnologias de uso e aplicação de coberturas verdes, principalmente na Alemanha. Na década de 70, realizou-se um número significativo de pesquisas acerca da tecnologia dos diferentes componentes das coberturas com vegetação, inclusive estudos sobre agentes inibidores de raízes, membranas impermeabilizantes, materiais drenantes, solos de peso leve e espécies de plantas (PECK, 1999).

Durante os anos 80, ocorreu um rápido desenvolvimento das coberturas verdes no mercado alemão. Uma média de crescimento de 15 a 20% ao ano. Em 1989, um milhão de metros quadrados de coberturas eram verdes. Em 1996, este número passou a ser de dez milhões de metros quadrados. Esse expressivo crescimento foi amplamente estimulado por leis municipais, estaduais e federais que subsidiavam de 35 a 40 marcos alemães por metro quadrado de cobertura verde a ser construída (PECK, 1999).

Outros estados e cidades européias também adotaram práticas de incentivo semelhantes. Em Viena, Áustria, os subsídios são concedidos em três etapas do projeto: no planejamento, na instalação e três anos após a instalação, para assegurar manutenção e uso adequados. O motivo maior, desses governos, em apoiar a implantação de coberturas verdes está associado aos benefícios qualitativos e quantitativos no gerenciamento da água de chuva (JOHNSTON, 1996, p.48).

2.3 Definição de coberturas verdes

Cobertura verde, ajardinada ou ecológica é toda estrutura de telhado ou cobertura que agrega em sua composição, uma camada de solo e outra de vegetação, uma vez que seu sistema construtivo se baseia em uma técnica de aplicação de camadas (PECK, 1999). Conforme sua tipologia, podem ser classificadas em intensivas ou extensivas.

A cobertura verde intensiva (Figura 2.5) caracteriza-se por: camadas de solo maiores que 20cm; plantas, arbustos e árvores de médio e grande porte, que exigem um ambiente de desenvolvimento mais complexo; estrutura reforçada (devido às cargas entre 700 e 1200kg/m²) e manutenção rigorosa (CORREA; GONZÁLEZ, 2002).

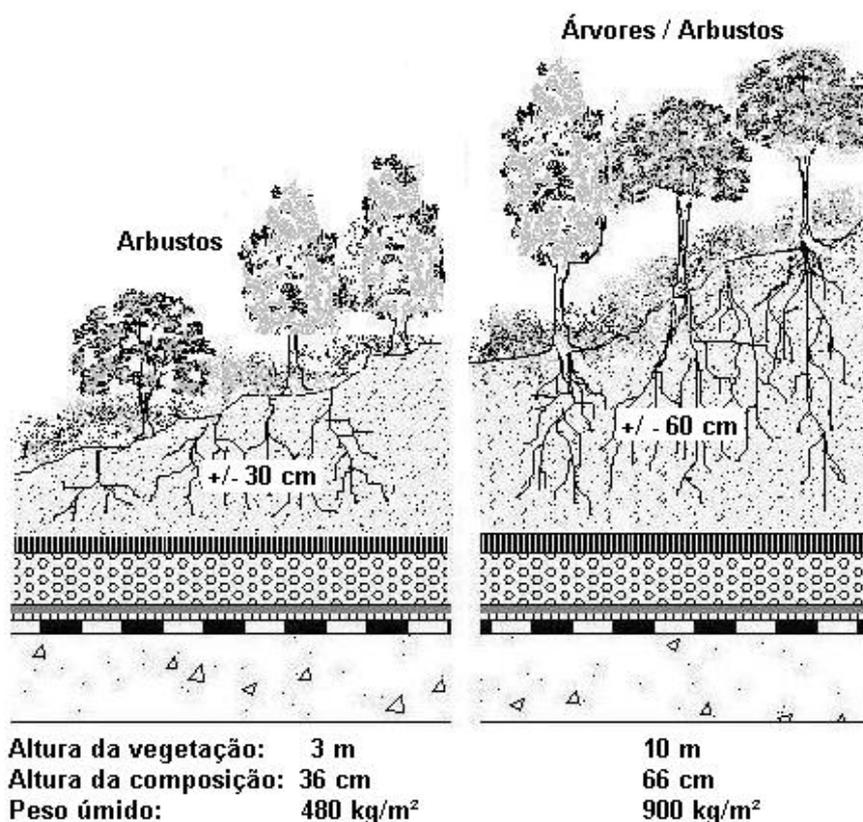


Figura 2.5: Corte esquemático de cobertura verde intensiva

Fonte: PLANNING GUIDE, 2000a.

A cobertura verde extensiva (Figura 2.6) caracteriza-se por uma camada mais delgada de solo, com espessura entre 8 e 12cm e carga média equivalente a 100kg/m², plantas de pequeno porte, como as autóctones, por serem mais resistentes a pouca ou nenhuma manutenção (CORREA; GONZÁLEZ, 2002). Devido à pouca profundidade do solo e microclimas extremos, em muitas coberturas a rega e a fertilização são feitas até a fase de estabilização das plantas. De modo geral, é necessário o mínimo de perícia técnica e experiência prática para instalação e manutenção de coberturas com vegetação (JOHNSTON, 1996, p.54).

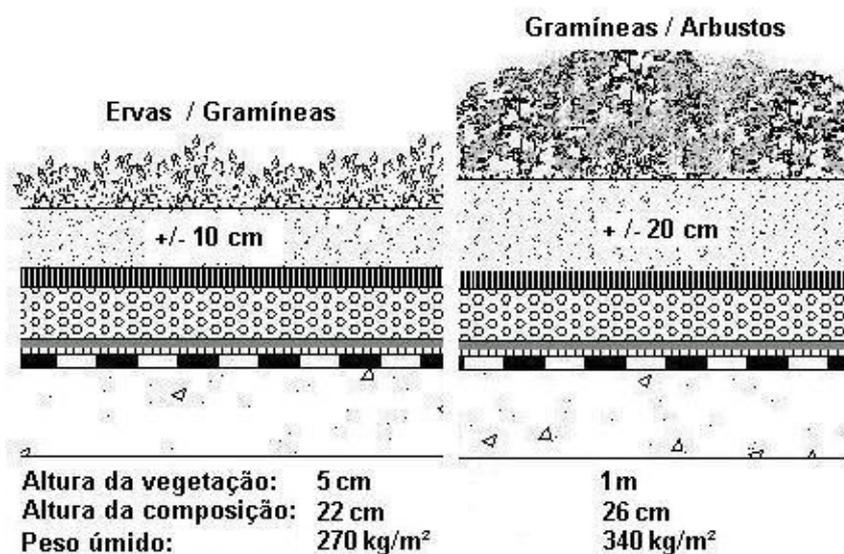


Figura 2.6: Corte esquemático de cobertura verde extensiva

Fonte: PLANNING GUIDE, 2000b.

2.4 Detalhes construtivos e elementos de projeto

Em ordem descendente, os seguintes materiais são usados nas camadas de coberturas verdes extensivas (Figura 2.7):

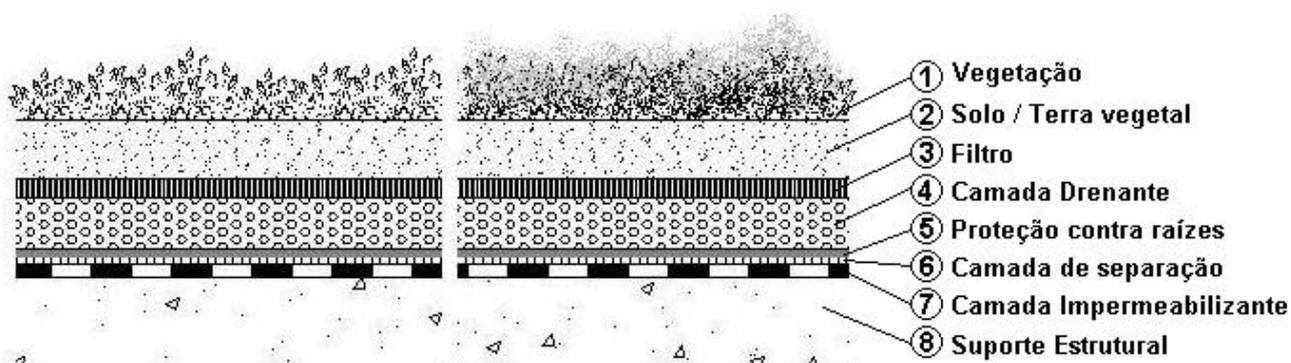


Figura 2.7: Camadas componentes de uma cobertura verde extensiva

Fonte: PLANNING GUIDE, 2000c.

1. **Vegetação.** Alguns condicionantes para sua escolha são: clima, tipo de solo, estrutura suporte, tipo de manutenção (se haverá ou não irrigação). Em caso de dúvida acerca das condições de manutenção, a alternativa é utilizar espécies que não exigem muita umidade. As plantas nativas são as mais indicadas.

2. **Solo**, substrato orgânico ou terra vegetal (suporte sólido, inerte ou não, diferente do solo ou da terra natural). Para garantir boa drenagem deve ser evitado solo argiloso. Uma boa composição pode ser obtida com uma mistura de terra vegetal (4 partes), aditivo mineral (1 parte de areia fina lavada) e aditivo orgânico (1 parte de húmus). Sua espessura varia de acordo com o tipo de vegetação escolhida. Quanto maior o tamanho das plantas a serem cultivadas, maior a profundidade da camada de solo.
3. **Camada filtrante**. Normalmente utiliza-se uma manta geotêxtil de aproximadamente 150g/m², cuja função é evitar que a água, das chuvas ou regas, arraste as partículas de solo. De acordo com Morgado (1995) e indicações do fabricante, a manta ideal é a de 200g/m², que deve ser instalada sobre a camada drenante e ao longo de todo o perímetro do rodapé com largura mínima de 20cm.
4. **Camada drenante**. Fundamental para o sistema, pode ser constituída por brita, argila expandida ou seixo rolado, em camadas de 7 a 10cm de espessura, para dar vazão ao excesso de água do solo. A espessura varia em função da espessura da camada de solo. Os elementos manufaturados a base de poliestireno são os mais utilizados na Europa, pois funcionam também como isolante térmico. Um elemento com 14cm de espessura apresenta resistência térmica de 1,6m²C/W, que corresponde a 6,5cm de um bom isolante térmico (POUEY, 1998a).
5. **Camada de proteção** contra raízes ou camada de retenção de água (painéis absorventes de materiais sintéticos). Aplicada sobre a camada de impermeabilização, especialmente quando forem utilizadas árvores.
6. **Camada de separação** ou isolante térmico, escolhido em função da transmitância térmica. Poliestireno extrudado é usual;
7. **Camada impermeabilizante**. Pode ser de diferentes tipos betuminosos ou sintéticos, cuja função é proteger o suporte estrutural contra infiltrações.
8. **Laje** ou outro tipo de suporte estrutural. Devem ser consideradas cargas permanentes (o peso de todas as camadas que compõem o sistema e o peso da água) e acidentais (circulação de pessoas e de máquinas de manutenção).

Em estudo de aplicação com plantas para telhados vivos extensivos em cidades de clima tropical, Laar (2001) analisou algumas espécies de plantas e identificou *Portulaca grandiflora*, *Tradescantia pallida*, *Asparagus densiflorus* e *Senecio confusus* dentre aquelas que apresentaram melhores condições de adequação.

Os anexos A, B, C e D apresentam, respectivamente, as cargas de alguns materiais construtivos, materiais para camadas superficiais, as profundidades mínimas da camada de terra e algumas espécies de plantas utilizadas na composição de sistemas de coberturas verdes.

As vantagens e desvantagens dos dois principais tipos de cobertura verde estão resumidas na Tabela 2.1. As informações descritas nesta tabela são genéricas, pois cada sistema, individualmente, pode ser uma combinação de extensivo e intensivo, dependendo

de fatores como localização, capacidade de carga estrutural do edifício, orçamento, disponibilidade de materiais e necessidades dos usuários.

Tabela 2.1: Comparação entre os sistemas Intensivo e Extensivo de coberturas verdes

Fonte: Adaptação de JOHNSTON, 1996, p.54.

	Extensivo	Intensivo
Descrição	Fina camada de solo; Pouca ou nenhuma manutenção; Plantas resistentes.	Profunda camada de solo; Sistema de irrigação; Rigorosa manutenção;
Vantagens	Baixo peso; Apropriado para grandes áreas; Conveniente para coberturas com inclinação de 0 a 30°; Não requer sistemas de irrigação; Relativamente requer pouca perícia técnica; Adequado para restauração, ou "retrofit", de edifícios; Permite desenvolvimento espontâneo da vegetação; Custo relativamente baixo; Aparência mais natural; Mais fácil para se tornar condição de aprovação de projeto	Maior diversidade de plantas; Boas propriedades de isolamento; Pode simular um jardim ao chão para os animais; Pode ser muito atrativo; Visualmente acessível com maior frequência; Diversas utilizações da cobertura (recreação, produção de alimentos, áreas livres).
Desvantagens	Escolha mais limitada de plantas; Normalmente não é acessível para recreação e outros usos; Não atrativo em algumas situações, principalmente no inverno.	Maior peso de carga na cobertura; Necessita de sistemas de drenagem e irrigação; Requer maiores quantidades de energia e água; Exige sistemas mais complexos e mais perícia técnica.

Os sistemas de coberturas verdes podem ser classificados ainda como acessíveis ou inacessíveis. Uma cobertura verde acessível é uma área aberta destinada ao uso de pessoas, como terraço ou jardim. Esse tipo de cobertura freqüentemente proporciona benefícios sociais aos seus usuários e agrega valor de mercado ao edifício. A cobertura verde inacessível não permite a circulação de pessoas. Pode ser plana, curva ou com inclinações maiores que 30° (PECK, 1999).

2.5 Manutenção de coberturas verdes

As freqüências de manutenção e irrigação dependem das espécies vegetais escolhidas e dos objetivos do projeto (POUEY, 1998a). Entre os itens relacionados com a

manutenção de uma cobertura verde destacam-se a irrigação, a fertilização e a poda de raízes (TREBILCOCK, 1998).

Como citado anteriormente, a depender do sistema de cobertura verde adotado, sua manutenção pode ser diferenciada da de um jardim comum ao nível do solo, mas uma vez cumpridas suas exigências mínimas, os cuidados com um jardim sobre cobertura tornam-se similares aos com um jardim comum.

2.6 Custos

Os custos de implantação de coberturas verdes parecem ser mais altos do que realmente são. A Alemanha tem uma organizada indústria de serviços de instalação de coberturas verdes, o que reduz significativamente os custos iniciais. Todavia, entre os alemães, a mesma escala de economia não foi percebida, pois apesar do aperfeiçoamento dos métodos de fabricação e instalação, os altos custos iniciais ainda limitam o uso de coberturas verdes (WONG, 2003c).

Segundo Johnston (1996, p.12), uma cobertura verde extensiva pode ser até 80% mais barata que uma cobertura verde intensiva. Contudo, os custos de instalação de uma cobertura verde tornam-se difíceis de calcular devido às consideráveis variações de projetos. Sua instalação requer um certo capital de investimento, especialmente numa situação de readaptação ou "retrofit". Entretanto, essa despesa inicial pode ser compensada com a redução do consumo energético e das despesas com manutenção.

Nos Estados Unidos o custo estimado é de 160 a 200 dólares por m² para qualquer tipo de cobertura verde (residencial, comercial, industrial e institucional). Esses valores incluem todos os processos necessários, desde a camada impermeabilizante até a camada de plantas (COST..., 2002; THE..., 2002).

Em estudo de análise dos custos e benefícios de sistemas de coberturas verdes inacessíveis na região metropolitana de Nova Iorque, Estados Unidos, Lake (2003) constatou que do total dos custos gerais de construção, entre 5% e 10% referem-se à etapa de projeto. O custo do sistema de cobertura como um todo varia entre 50 e 100 dólares por m². A Tabela 2.2 apresenta os outros valores obtidos.

Tabela 2.2: Custos gerais de construção de um sistema de cobertura verde inacessível

Fonte: LAKE, 2003.

Etapa	Dólares (\$) por m²
Membrana de proteção contra raízes	86 a 129
Sistema de cobertura verde	53 a 107
Plantas	10 a 139
Instalação e mão-de-obra	32 a 86
Manutenção	13 a 21
Irrigação	21 a 43

2.7 Benefícios qualitativos e quantitativos das coberturas verdes

As paisagens urbanas e suburbanas evidenciam contrastes e desigualdades no ecossistema natural. Em larga escala, isto resulta em fatores como alta concentração populacional, áreas impermeáveis, superfícies refletivas, importação de energia e geração de produtos que não podem ser reintegrados ao ecossistema, causando a poluição do solo, da água e do ar. A introdução de vegetação na cobertura de edifícios pode recuperar o equilíbrio do ecossistema urbano (ZIPPERER; ZIPPERER, 1992).

2.7.1 Melhora da qualidade do ar

Coberturas verdes podem reduzir a quantidade de energia necessária para aquecer ambientes, diminuindo as flutuações térmicas e filtrar o ar que se move entre elas. As plantas também são conhecidas por absorver e seqüestrar gases poluentes, por meio do processo de fotossíntese (HARAZONO, 1991).

A partir de estudos realizados em ruas arborizadas, supõe-se que uma cobertura com grama, com área de 2000m² (100m² de superfície verde por m² de cobertura) pode absorver 4000kg de sujeira do ar (2kg por m² de cobertura), ou seja, 0,2kg de partículas de ar sujas por m² ao ano. Entretanto, esses dados são estimados, uma vez que a porção mais baixa da camada de grama é muito densa para estar em contato direto com o movimento do ar (MINKE, 1982, p.11, citado por PECK, 1999).

Segundo Harazono (1991), a melhoria na qualidade do ar, proporcionada pelas coberturas verdes, beneficia diretamente pessoas que sofrem de asma e outras doenças respiratórias, além de amenizar a poluição de verão e outras formas de contaminação do ar. O uso comum desse tipo de cobertura também estenderia a vida de toda infra-estrutura urbana suscetível à degradação devido à poluição atmosférica.

2.7.2 Alterações climáticas e microclimáticas

Por intermédio do acondicionamento do ar de espaços internos aos edifícios, que têm um papel expressivo na demanda por energia, as áreas urbanas são uma fonte significativa de emissão dos gases do efeito estufa. Neste sentido, as coberturas verdes podem constituir um eficiente sistema construtivo capaz de reduzir os danos causados por esse efeito, por sombrear direta e individualmente os edifícios, oferecer valores propícios de isolamento e amenizar o efeito urbano de “ilha de calor”, microclima causado por diferenças de temperaturas entre áreas urbana e rural das cidades, devido, principalmente, à alta expansão de superfícies impermeáveis e refletivas das áreas urbanas (MERCIER, 1998).

Niachou (2001) realizou medições de temperatura do ar e de superfície em edifícios comerciais com e sem coberturas verdes, em Atenas, Grécia, com o objetivo de avaliar as propriedades térmicas, bem como o impacto na redução do consumo de energia das coberturas com vegetação. Durante um dia típico de verão, as menores cargas térmicas foram registradas nos edifícios com cobertura vegetal, cujas temperaturas internas variaram entre 26 e 29°C.

Wong (2003b) avaliou o impacto quantitativo da cobertura no consumo energético de edifícios comerciais em Cingapura. Os resultados mostraram que a instalação de coberturas verdes, em cinco edifícios, reduziu em até 15% o consumo energético anual (uma economia de mais de 3000 mil dólares). A carga interna de resfriamento e a transferência de carga térmica da cobertura foram reduzidas em até 79% e 81%, respectivamente.

2.7.3 Controle da temperatura

De acordo com Kawashima (1991), muito da energia solar que incide sobre uma superfície de asfalto ou concreto é irradiado em forma de calor. Uma camada de vegetação pode interceptar a luz natural e reduzir este calor por intermédio da evapotranspiração das plantas, regulando as variações bruscas de temperatura. Num dia típico de verão essa absorção de energia solar por parte das plantas, que pode ser de até 90%, diminui a temperatura das superfícies.

Em Thessaloniki, Grécia, Eumorfopoulou e Aravantinos (1998) avaliaram o comportamento térmico de coberturas verdes, comparando-as com coberturas sem vegetação, com e sem isolamento térmico. Os resultados mostraram que as coberturas verdes contribuem para um melhor desempenho térmico dos edifícios, reduzindo a radiação solar e as variações térmicas diárias e anuais. No verão, do total da radiação solar que

incide em uma cobertura verde, 27% são refletidos, 60% são absorvidos e apenas 13% são transmitidos. As temperaturas superficiais das coberturas tradicionais alcançaram 70°C, enquanto que as das verdes não ultrapassaram os 30°C. As transmitâncias térmicas das coberturas vegetais apresentaram valores entre 26 e 58% dos observados nas outras.

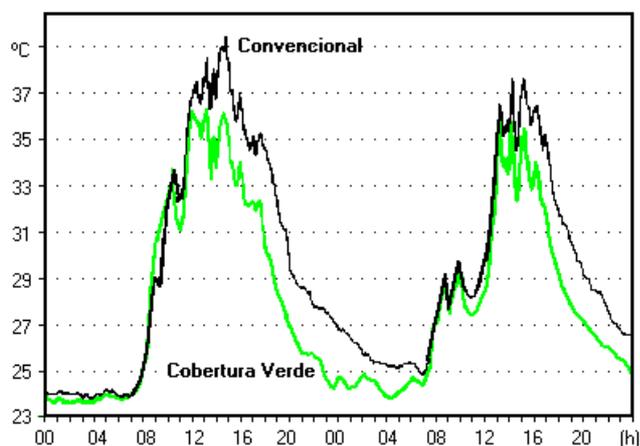


Figura 2.8: Temperatura do ar em ambientes com diferentes coberturas

Fonte: WONG, 2003b.

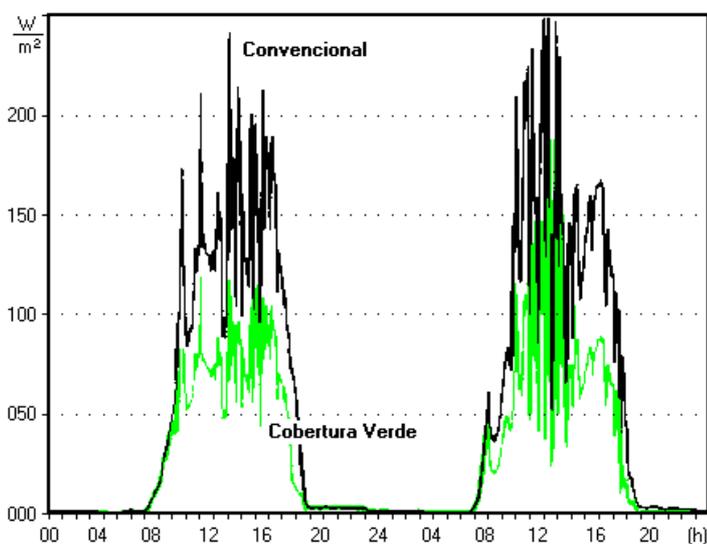


Figura 2.9: Radiação térmica emitida por diferentes coberturas

Fonte: WONG, 2003b.

Wong (2003b) realizou algumas medições em Cingapura para investigar o impacto térmico causado pelas plantas de coberturas verdes, quanto à redução das temperaturas de superfície, redução do ganho de calor e variações térmicas. As medições foram feitas em dois tipos de cobertura, uma com e outra sem vegetação. O efeito de refrigeração das plantas foi confirmado pelas temperaturas do ar ambiente medidas em diferentes alturas. A

diferença máxima observada na temperatura do ar (Figura 2.8) foi de 4,2°C. e na temperatura de globo foi de 4,5°C. A diferença máxima entre as radiações emitidas pelas duas coberturas (Figura 2.9), ocorreu ao meio-dia e foi de 109 W/m². Estes resultados confirmaram que as coberturas verdes são termicamente benéficas tanto para o edifício como para o seu entorno.

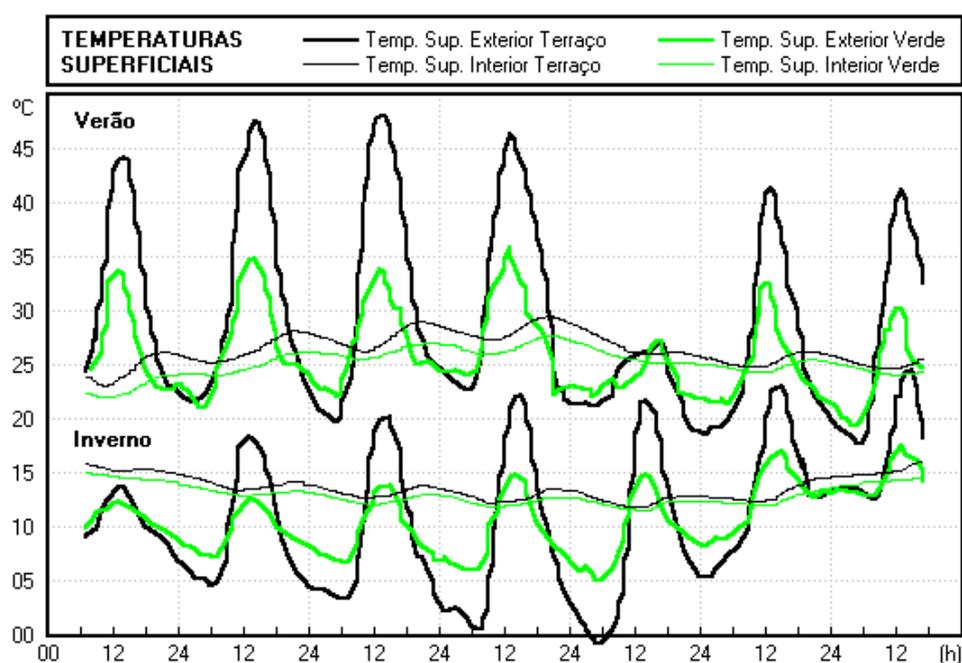


Figura 2.10: Evolução das temperaturas superficiais externas e internas

Fonte: POUHEY, 1998b.

Pouey (1998b), monitorou o desempenho térmico de uma cobertura verde e de uma outra, tipo terraço, na cidade de Pelotas, RS, durante períodos de verão e inverno. Os resultados mostraram que, em termos de temperaturas superficiais (Figura 2.10), a externa da cobertura verde registrou menor amplitude de variação, tanto no inverno quanto no verão e, a interna, foi menor no verão e praticamente igual à do terraço no inverno. Quanto às temperaturas do ar interno, as da cobertura verde foram sempre menores no verão e, no inverno, tornaram-se iguais ou superiores às temperaturas internas do terraço. Portanto, a cobertura verde apresentou melhores respostas.

2.7.4 Isolamento térmico

Onmura (2001) conduziu medições de campo em uma cobertura com vegetação, no Japão, com o objetivo de investigar o efeito de refrigeração evaporativa. Com isso, foi

constatado um decréscimo na temperatura superficial da cobertura de 60 para 30°C, ou seja, uma redução de 50%.

Considerando dados climáticos de cidades gregas, Del Barrio (1998) explorou o comportamento térmico deste tipo de cobertura por meio de uma análise matemática. A principal conclusão desse estudo foi que, naqueles climas, coberturas verdes atuam melhor como dispositivo de isolamento do que refrigerador da cobertura. Neste sentido, o projetista deve privilegiar plantas com folhagem larga, de modo a garantir uma baixa transmissão de radiação solar; e escolher solo leve, que reduza a condutividade térmica e o peso da cobertura.

Aravantinos (2002) avaliou o comportamento térmico de coberturas de edifícios com e sem vegetação na cidade de Stavroupoli, Grécia. Foram obtidos dados de verão e inverno. Durante o verão, a cobertura com vegetação apresentou temperaturas de superfície menores. A carga térmica de refrigeração, necessária para reduzir a temperatura a um nível satisfatório, é substancialmente mais baixa no edifício com cobertura verde. Verificou-se, também, uma contribuição particular da vegetação, a possibilidade de redução da espessura da camada de isolante térmico.

Segundo Minke citado por Peck (1999), uma cobertura verde é mais eficiente como isolante térmico, quando agrega várias espécies e espessuras de grama, cujo desempenho é melhor do que camadas de vegetação com espécies e espessuras limitadas. Contudo, o isolamento térmico proporcionado por uma cobertura verde deve-se ao conjunto formado pelas camadas de solo e de vegetação, cujos benefícios dependem da espessura da camada de solo e do tipo de vegetação.

Machado (1999), a fim de determinar o comportamento de coberturas com vegetação, realizou medições em algumas construções das cidades de Madri, Espanha, e Maracaibo, Venezuela. Em Madri, a variação diária de temperatura interna, nos modelos com cobertura verde, foi de 0,3 a 5,3°C. As simulações térmicas realizadas em Maracaibo mostraram que os edifícios com temperaturas mais baixas foram aqueles com cobertura verde, onde a temperatura máxima não ultrapassou 28,2°C. Os resultados evidenciaram que a cobertura verde reduz a transferência de calor, agindo como um isolante térmico. Afirmam, ainda, que esta cobertura tem muitas vantagens arquitetônicas, construtivas, ambientais e estéticas.

Em Madri, Espanha, monitorando uma cobertura verde, Machado (2001) determinou a sua condutividade térmica equivalente. Para tanto, formularam uma equação que

estabelece a relação entre os balanços energéticos de uma cobertura vegetal em um meio natural e o de uma cobertura verde sobre uma edificação. Considerando as parcelas de radiação solar absorvida, refletida, transmitida e evapotranspirada durante o processo de fotossíntese, além do fluxo de calor convectivo da camada de vegetação e as transferências de calor por condução. Obteve assim, uma equação para o cálculo da condutividade térmica equivalente da cobertura verde, cujo resultado de $0,12\text{W/m}^{\circ}\text{C}$, tem sido avaliado e comparado com outros estudos realizados em laboratório.

2.8 Outros benefícios das coberturas verdes

Devido às várias funções da vegetação, as coberturas verdes podem ter bom desempenho na atenuação do efeito urbano de “ilha de calor”; na redução dos níveis de dióxido de carbono (CO_2) produzidos pelos veículos, indústrias e sistemas mecânicos; além de auxiliar no manejo de águas pluviais, uma vez que superfícies verdes não só retêm boa parcela da precipitação que incide sobre ela, como também moderam a temperatura da água e atuam como um filtro, melhorando a qualidade da água de chuva, permitindo seu reaproveitamento (JOHNSTON, 1996, p.12).

Estudos revelaram que o solo, a vegetação e a camada de ar presa entre as plantas e as superfícies construídas podem ser usados como isolantes sonoros. As ondas sonoras produzidas pelas máquinas, tráfego e aeronaves podem ser absorvidas, refletidas e desviadas. O solo tende a bloquear as freqüências de som mais baixas e, as plantas, as freqüências mais altas. Alguns testes mostraram que camadas de solo, de 12 e 20cm de espessura, podem reduzir 40 e 46dB de som, respectivamente (RAZA, 1991).

De acordo com Wilmers (1990-1991), a utilização de coberturas verdes protege a cobertura dos edifícios contra a radiação ultravioleta e as extremas variações de temperatura, evitando falhas de uso e manutenção, prolongando a vida útil da cobertura e melhorando o aspecto visual e estético do edifício.

Segundo Johnston (1996, p.27), o contato com a vegetação tem resultado em benefícios diretos para a saúde humana. Pessoas que vivem em áreas densamente construídas, mas fazem uso de uma cobertura ou terraço com vegetação, estão menos propensas a adquirir doenças, principalmente as respiratórias.

De modo geral, os benefícios econômicos e oportunidades de construção dos telhados verdes incluem: redução nos gastos com energia necessária ao aquecimento e

resfriamento dos espaços internos das construções; redução na emissão de gases do efeito estufa; prolongamento da vida útil da cobertura; menores custos com manutenção e melhora na captação de águas pluviais. Na Alemanha, os proprietários de imóveis com cobertura verde recebem descontos nas taxas de impostos (PECK, 1999).

Os serviços necessários à instalação de coberturas verdes têm significativo impacto no aumento de empregos no mercado de trabalho. Desde 1982, na Europa, onde podem ser encontrados vários exemplos de aplicação de telhados verdes (Figura 2.11, Figura 2.12, Figura 2.13, Figura 2.14, Figura 2.15 e Figura 2.16), o crescimento médio anual da indústria de cobertura verde é de 15 a 20%. Nesse setor, a Alemanha é o país que mais se destaca (PECK, 1999).



Figura 2.11: Centro comunitário, Nottingham, Inglaterra

Fonte: THECHASE2, 2002.



Figura 2.12: Complexo escolar, Stuttgart, Alemanha

Fonte: ROOFTOP02, 2003.



Figura 2.13: Centro de compras, Chemnitz, Alemanha

Fonte: Z_FACTORY1, 2003.



Figura 2.14: Casa do Futuro, Museu da Vida Galesa, Cardiff, País de Gales

Fonte: MAIN5, 2002.



Figura 2.15: Edifício residencial, Stuttgart, Alemanha

Fonte: ROOFTOP02b, 2003.



Figura 2.16: Escola Internacional, Lyons, França

Fonte: LYONSSCHOOLGR, 2002.

2.9 Dificuldades de implantação e difusão das coberturas verdes

Apesar da boa aceitação e intensiva implantação das coberturas verdes nos países da Europa, problemas como a falta de projetos pilotos, incertezas quanto a custos e benefícios e estranheza causada pela falta de conhecimento por parte de técnicos e usuários têm sido suficientes para impedir a sua propagação em outros continentes.

De acordo com Peck (1999), essas dificuldades estão estruturadas em quatro categorias básicas: Falta de conhecimento e de consciência dos profissionais, indústrias de desenvolvimento, políticos e público em geral; Ausência de incentivo do poder público para implementação, ocasionada, principalmente, pela falta de informação dos benefícios sociais, ambientais e econômicos das coberturas verdes; Falta de informação associada à custos com projeto e execução e, por fim, incertezas quanto a riscos e questões técnicas, uma vez que alguns dos problemas relativos às coberturas verdes são causados por falhas nos processos de instalação e manutenção, drenagem inadequada ou negligenciada.

2.10 Desempenho térmico de coberturas verdes

Os estudos relativos ao cálculo do desempenho térmico de coberturas verdes apresentados neste item restringem-se aos cálculos do fluxo de calor que atravessa uma cobertura comum e da resistência e condutividade térmicas equivalentes de uma cobertura com vegetação. Entretanto, convém expor os conceitos de amplitude, amortecimento e atraso térmicos adotados neste trabalho.

2.10.1 Cálculo do fluxo de calor em uma cobertura comum

Para avaliar e comparar o desempenho térmico de coberturas de edifícios sujeitas a mudanças periódicas de temperatura ambiente e radiação solar, na Arábia Saudita, Al-Sanea (2002) formulou um modelo matemático considerando as seguintes hipóteses:

- i. Inexistência de geração de calor.
- ii. Bom contato direto das camadas da cobertura, portanto, resistência entre as faces internas é desprezível.
- iii. Variação desprezível das propriedades térmicas.
- iv. Variação de temperatura unidimensional, devido à pouca espessura da cobertura.
- v. Coeficiente de convecção constante baseado na direção do fluxo de calor e na média diária de velocidade do vento.

A Figura 2.17 mostra um esquema da configuração geométrica das camadas de uma cobertura com diferentes espessuras e propriedades térmicas. A secção da cobertura consiste em um número (n) de camadas. A superfície externa está exposta à radiação solar I (W/m^2), a um fluxo de calor por convecção Q_1 (W/m^2) e às trocas por radiação com o céu Q_2 (W/m^2). A superfície interna está sujeita à uma combinação de fluxos de calor por convecção e por radiação Q_i (W/m^2) em sentido ascendente.

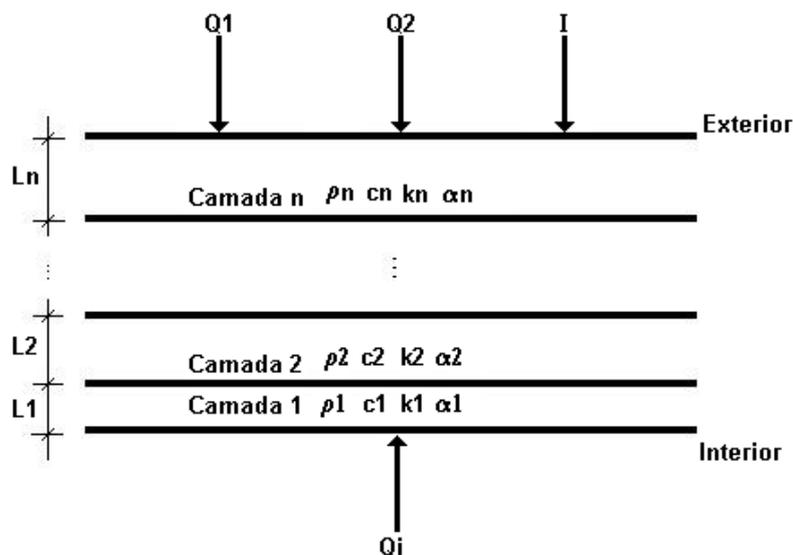


Figura 2.17: Esquema de composição de camadas de uma cobertura

Fonte: AL-SANEA, 2002.

Baseada nas hipóteses citadas anteriormente, a equação de condução que rege a transferência de calor na cobertura é dada pela Equação 1,

$$\frac{\partial^2 T_j}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha_j} \frac{\partial T_j}{\partial t} \quad (1)$$

onde $\alpha = \lambda / \rho c$ (m^2/s) é a difusividade térmica e j refere-se à camada, por exemplo, $j = 1, 2, \dots, N$, λ ($\text{W}/\text{m}^\circ\text{C}$) é a condutividade térmica, ρ (kg/m^3) é a densidade e c ($\text{J}/\text{kg}^\circ\text{C}$) o calor específico, subentendidos em α .

2.10.2 Cálculo da resistência térmica em uma cobertura verde

Para examinar o impacto quantitativo de uma cobertura verde no consumo de energia de um edifício, Wong (2003a) utilizou os valores da resistência equivalente R ($\text{m}^2\text{C}/\text{W}$) dos tipos de vegetação analisados para simulações subseqüentes. A Figura 2.18 ilustra as variáveis para o cálculo da resistência térmica das plantas. A Figura 2.18 (a) ilustra uma cobertura sem vegetação, composta de laje plana comum. Na Figura 2.18 (b) foi considerada uma camada homogênea adicional de vegetação,

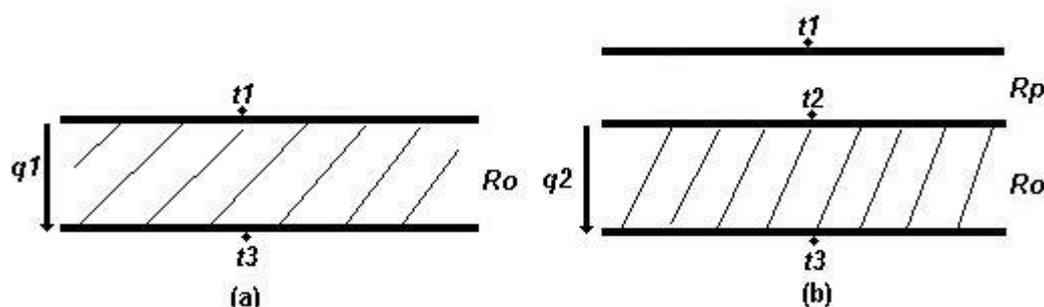


Figura 2.18: Ilustração para cálculo da resistência térmica das plantas

Fonte: WONG, 2003b.

onde $t1$ ($^\circ\text{C}$) é a temperatura superficial média das faces externas para os dois tipos de cobertura; $t2$ ($^\circ\text{C}$), a temperatura superficial média do solo e $t3$ ($^\circ\text{C}$), a temperatura superficial média das faces internas das coberturas, $q1$ (W/m^2) é o fluxo de calor por unidade de área que atravessa a cobertura sem vegetação; $q2$ (W/m^2) é o fluxo de calor por unidade de área que atravessa a cobertura com vegetação; Rp ($\text{m}^2\text{C}/\text{W}$) é a resistência térmica da vegetação; Ro ($\text{m}^2\text{C}/\text{W}$) é a resistência térmica total da cobertura, considerando todas as camadas. Sendo assim, a taxa do fluxo de calor por unidade de área que atravessa toda a cobertura pode ser estimada com a Equação 2,

$$q = \frac{1}{\sum R} \Delta t \quad (2)$$

onde q (W/m^2) é a taxa do fluxo de calor por unidade de área do elemento componente, $\sum R$ (m^2C/W) é a resistência total (ou somatório das resistências individuais) e Δt ($^{\circ}C$) é a diferença das temperaturas superficiais. Em condições constantes, a taxa do fluxo de calor por unidade de área em cada superfície é dada pela Equação 3,

$$q_2 = \left(\frac{1}{R_p + R_o} \right) (t_1 - t_3) = \left(\frac{1}{R_o} \right) (t_2 - t_3) \quad (3)$$

portanto, $R_p = R_o \frac{(t_1 - t_2)}{(t_2 - t_3)}$.

2.10.3 Cálculo da condutividade térmica equivalente em cobertura verde

Machado (2001), tendo monitorado uma cobertura verde na Universidade Politécnica de Madrid, Espanha, determinou sua condutividade térmica equivalente. Para tanto, foi formulada uma equação que estabelece uma relação entre o balanço energético de uma camada vegetal natural e uma cobertura verde sobre um edifício.

De acordo com Machado (2001), o valor da condutividade térmica, para os materiais inertes, é obtida por meio de ensaios de laboratório. No caso de uma superfície ou material ativo, como é a cobertura verde, devem ser consideradas as interações entre esta e os fatores do meio ambiente que a cerca, como: temperatura, evapotranspiração, umidade, radiação solar, precipitação, fotossíntese, etc.

Considerando, além dos fatores citados acima, o fluxo de calor por convecção no interior da camada vegetal e as trocas de calor por condução, o cálculo da condutividade térmica equivalente de coberturas verde, conduzido por Machado (2001), envolve, ainda, equações do método de Penman-Monteith.

Entretanto, as equações propostas por Machado (2001), para o cálculo da condutividade térmica equivalente de coberturas verdes, se mostraram pouco precisas e passíveis de maiores esclarecimentos por parte dos autores. Sendo assim, neste trabalho, essas equações não foram detalhadas.

De acordo com Theodosiou (2003), entre os estudos sobre coberturas verdes, são raros os que abordam um exemplo real, concernente a uma cobertura verde já existente em algum edifício. A maioria é feita com modelos de escala relativamente menor, em nível de experimentação, as quais não correspondem exatamente às várias condições a que as

edificações estão submetidas. Isso, aliado à variedade de climas existentes em diferentes localidades, dificulta a padronização de modelos de cálculos a respeito da proteção térmica dos edifícios proporcionada pelas coberturas verdes.

2.10.4 Amplitude, amortecimento e atraso térmicos

Segundo Givoni (1976, p.121), a temperatura do ar externo e a radiação solar seguem padrões cíclicos diurnos e anuais, cujos limites de variação dependem da localização geográfica. As condições térmicas internas às edificações, sem controle mecânico, seguem esses padrões com algumas modificações devido a detalhes de projeto e de construção. As principais modificações são as variações de amplitude entre temperaturas máximas e mínimas. De acordo com Rivero (1985, p.77), a temperatura do ar segue uma variação sinusoidal, apresentando um máximo que ocorre após o meio-dia.

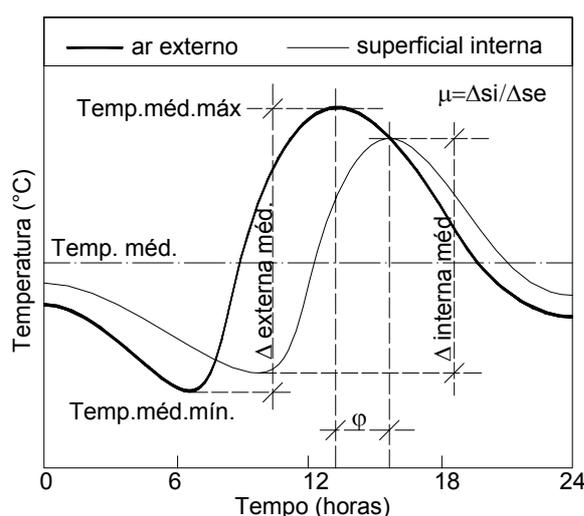


Figura 2.19: Esquema demonstrativo de amplitude, atraso e amortecimento térmicos

Fonte: Adaptado de RIVERO, 1985.

Considerando a temperatura do ar externo e a temperatura superficial interna de um fechamento qualquer (Figura 2.19), a amplitude térmica média (Δ) é a diferença entre as temperaturas médias máxima e mínima; o atraso térmico (φ) é o tempo, em horas, transcorrido entre a variação térmica no exterior e sua manifestação na superfície interna do fechamento; e o amortecimento térmico (μ) é a capacidade do fechamento de diminuir a amplitude das variações térmicas, obtido por meio da razão entre amplitude superior interna (Δ_{si}) e amplitude superior externa (Δ_{se}) (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

2.11 O Processo de Evapotranspiração (PE)

De acordo com Allen (1998), evapotranspiração, de uma superfície com vegetação, é a combinação de dois processos isolados, onde há a perda de água tanto do solo quanto das plantas. No solo, essa perda se dá por evaporação e na vegetação, por transpiração. Nesse processo, a evaporação e a transpiração ocorrem simultaneamente, por isso há uma certa dificuldade em dissociar esses dois processos.

Quando a vegetação é pouco desenvolvida, a perda de água do solo dá-se predominantemente por evaporação, já em uma vegetação bem desenvolvida e que cobre completamente o solo, o principal processo de perda de água é a transpiração (ALLEN, 1998). A Figura 2.20 ilustra os percentuais de evaporação e de transpiração durante a evapotranspiração, desde o plantio até a poda ou corte.

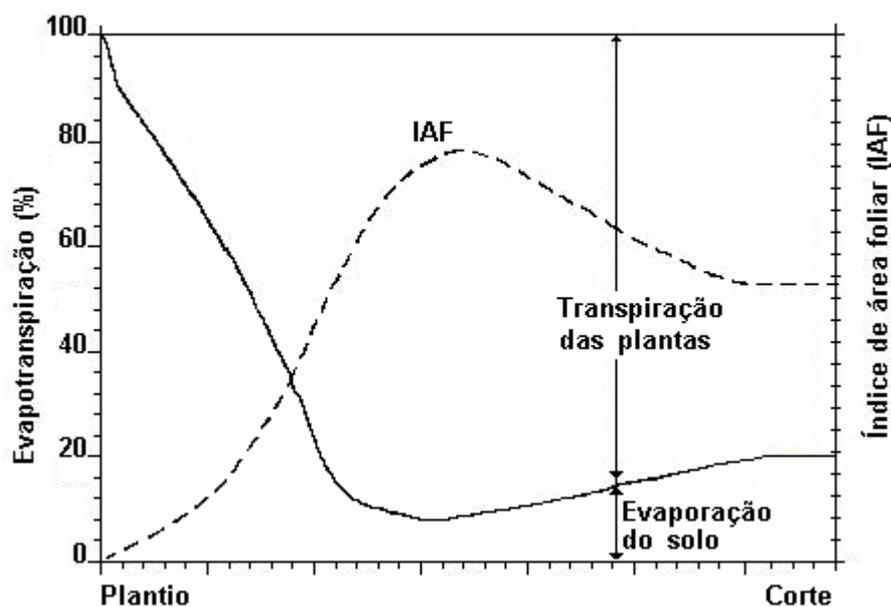


Figura 2.20: Percentuais de evaporação e transpiração durante a evapotranspiração

Fonte: ALLEN, 1998.

A taxa de evapotranspiração é expressa em milímetros (mm) por unidade de tempo (horas, dias, etc). Essa taxa indica a quantidade de água perdida de uma superfície de plantas em unidades de massa d'água.

Segundo Allen (1998) os fatores que mais afetam a evapotranspiração são parâmetros climáticos como radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento; características da vegetação (tipo, variedade e desenvolvimento) e manutenção e condições ambientais. Sendo assim, torna-se difícil quantificar a

evapotranspiração, pois são exigidos artifícios específicos e exatidão de medidas de vários parâmetros físicos e/ou o equilíbrio do volume de água presente no solo.

Os métodos utilizados para medir a evapotranspiração, freqüentemente, são dispendiosos e explorados, com mais precisão, por pesquisadores profissionais bem treinados. Embora esses métodos sejam impróprios para medidas de rotina, eles são importantes para estimar a evapotranspiração obtida por métodos indiretos (CAPECE, 2002).

De acordo com Allen (1998), a evaporação da água requer grandes parcelas de energia, seja na forma de calor sensível ou de energia radiante. Portanto, o processo de evapotranspiração é regido pelas trocas de energia na superfície da vegetação e é limitado pela quantidade de energia disponível.

Com isso, é possível prever o índice de evapotranspiração aplicando-se o princípio de conservação de energia. A energia que incide na superfície deve igualar-se à energia que procede da superfície num mesmo período de tempo. A equação para uma superfície evaporante pode ser escrita como na Equação 4,

$$R_n - G - \lambda ET - H = 0 \quad (4)$$

onde, R_n (MJ/m²dia) é a radiação líquida, H (MJ/m²dia) é o calor sensível, G (MJ/m²dia) é o fluxo de calor no solo e λET (MJ/m²dia) é o fluxo de calor latente. Essas variáveis podem ser positivas ou negativas. R_n positiva fornece energia para a superfície, enquanto que G , λET e H positivos, retiram energia da superfície.

Segundo Allen (1998), a evapotranspiração também pode ser determinada medindo-se os vários componentes do equilíbrio entre água e solo. O método consiste em avaliar, por um período de tempo, o fluxo de água que penetra e que sai da camada de raízes das plantas.

A irrigação (I) e as chuvas (Ch) aumentam o volume de água da camada de raízes. Parte desse volume d'água diminui por escoamento (E) e por percolação (P). Essa água também pode ser transportada, por capilaridade (C), de uma área com pouca água em direção às raízes ou fluir nas áreas internas (Ri) ou externas (Re) à camada de raízes. A evaporação do solo e a transpiração das plantas retiram toda a água da camada de raízes. Se todos os outros fluxos da evapotranspiração (ET) forem avaliados, a mesma pode ser

deduzida da mudança do conteúdo de água do solo (ΔSW) em um período de tempo (Equação 5).

$$ET = I + Ch - E - P + C \pm \Delta R \pm \Delta SW \quad (5)$$

Outros métodos de estimativa da evapotranspiração como o da transferência de massa e dos gradientes de velocidade do vento e de vapor d'água requerem medidas exatas de pressão de vapor, temperatura do ar e velocidade de vento em níveis diferentes acima da superfície. Portanto, sua aplicação é restrita a pesquisas específicas (ALLEN, 1998).

Segundo Capece (2002), devido à dificuldade em se obter medidas de campo exatas, a evapotranspiração é comumente calculada a partir de dados climáticos. Várias equações empíricas têm sido desenvolvidas para determinar a evapotranspiração de áreas verdes a partir de dados meteorológicos. Alguns métodos são válidos apenas para condições agronômicas e climas específicos.

Muitos pesquisadores têm analisado o desempenho de vários métodos de cálculo para diferentes localidades. Como resultado de uma conferência de especialistas, realizada em maio de 1990, foi escolhido o método de Penman-Monteith como método padrão para definição e cálculo da evapotranspiração (ALLEN, 1998).

2.12 O método de Penman - Monteith

Com a combinação dos métodos do balanço de energia e da transferência de massa, Penman desenvolveu, em 1948, uma equação para calcular a evaporação da água de superfícies ao ar livre a partir de registros climatológicos padronizados como radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. Esse método ficou conhecido como "método da combinação" (ALLEN, 1998).

Monteith, com base na formulação de Penman, desenvolveu uma equação que inclui fatores de resistência aerodinâmica e resistência ao fluxo de vapor pela folha (Figura 2.21). A equação combinada com os termos de resistência aerodinâmica e da superfície passou a ser chamada de equação de Penman-Monteith (CAPECE, 2002). A Equação 6 ilustra a equação combinada de Penman-Monteith.

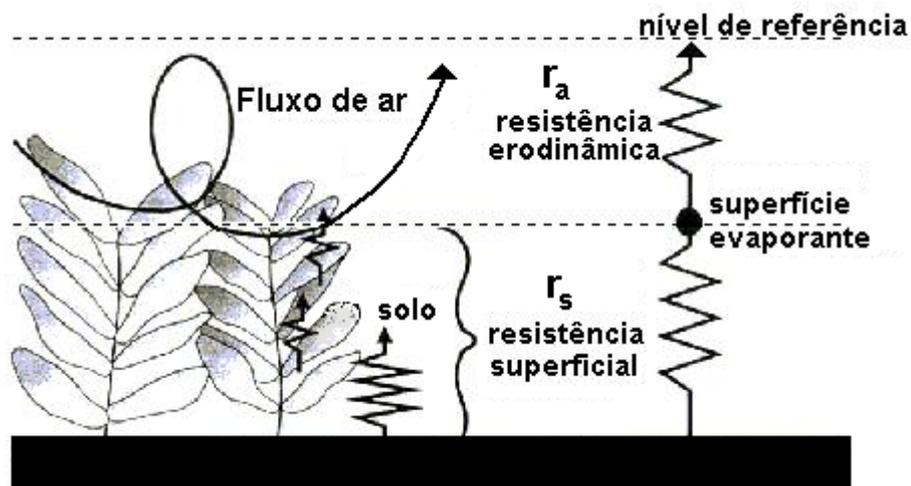


Figura 2.21: Esquema simplificado das resistências superficial e aerodinâmica

Fonte: Adaptado de ALLEN, 1998.

$$\lambda ET = \frac{\Delta(Rn - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)} \quad (6)$$

Onde λET ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{dia}$) é o fluxo de calor latente ou evapotranspiração, Δ (hPa/K), representa a declividade da pressão de vapor de saturação, Rn (W/m^2) é a radiação líquida, G ($\text{MJ}/\text{m}^2/\text{dia}$), o fluxo de calor solar, ρ_a (kg/m^3), a densidade do ar a uma pressão constante, c_p ($\text{W}/\text{kg}^\circ\text{C}$) é calor específico, $(e_s - e_a)$ (kPa), representa o déficit de pressão de vapor do ar, γ ($\text{kPa}/^\circ\text{K}$), constante psicrométrica e r_s e r_a (s/m) resistências superficial e aerodinâmica, respectivamente.

A resistência superficial descreve a resistência da superfície ao fluxo de vapor e depende da porosidade e da área de folhas da vegetação, enquanto que a resistência aerodinâmica refere-se à resistência ao fluxo de ar turbulento acima da vegetação (ALLEN, 1998; PONCE, 2003; KARVONEN, 2003).

Segundo Allen (1998), embora o processo de trocas térmicas em uma camada de vegetação seja muito complexo para ser completamente descrito pelos dois fatores de resistência, podem ser obtidas boas correlações entre as taxas de evapotranspiração medida e a calculada, principalmente se a superfície de referência for de grama uniforme.

De acordo com Roriz (2003), a taxa de evapotranspiração, obtida por meio da equação de Penman-Monteith, permite estimar as temperaturas superficiais das folhas de uma vegetação, que dependem de seu balanço energético com o meio ambiente. Entre os fatores que interferem nesse processo, a evapotranspiração é um dos mais complexos. Roriz (2003) desenvolveu o programa Jardim 1.0, o qual adota como base o modelo proposto por Penman-Monteith, para estimar as temperaturas superficiais em vegetação.

3 Material e Métodos

Este capítulo descreve a abordagem metodológica adotada que conduziu a pesquisa, a saber: identificação e análise das edificações a serem estudadas; caracterização e construção do protótipo; descrição dos instrumentos utilizados nos monitoramentos; medições ambientais; monitoramentos dos protótipos e tratamento estatístico dos dados obtidos.

Com o objetivo de analisar estatisticamente os dados referentes às variáveis medidas em ambas as coberturas, os métodos adotados foram o experimental e o comparativo, a fim de se ressaltar as diferenças e/ou similaridades existentes entre as coberturas estudadas.

3.1 Identificação e análise das edificações

Como uma das primeiras etapas da pesquisa, foi feita uma procura pela cidade de São Carlos e região para que fossem identificadas, analisadas e selecionadas edificações com tipologias construtivas que permitissem comparar os desempenhos de coberturas verdes com os das tradicionais.

As características analisadas foram: Variáveis do projeto arquitetônico como orientação, insolação e sombreamento, dimensões, aberturas, áreas envidraçadas, cores externas, etc e Variáveis do sistema construtivo como dimensões dos componentes e propriedades termofísicas dos materiais (condutividade, massa e calor específicos).

Após a procura na região, foram encontrados apenas dois exemplos de cobertura verde, um em São Carlos e outro, em Araraquara. Nenhum deles, entretanto, apresentava

as características desejáveis ao tipo de monitoramento programado, confirmando o fato de que, na região de São Carlos, são escassas as edificações com coberturas verdes.

Com isso, surgiu a proposta de construção de vários protótipos, sendo cada um com um tipo de cobertura diferente (laje simples, laje com telha cerâmica, laje com telha de fibrocimento, etc), mas frente a prazos exíguos e custos relativamente altos, optou-se por aproveitar alguma edificação já existente no próprio *campus* da Universidade Federal de São Carlos.

Por meio de um levantamento feito junto ao Escritório de Desenvolvimento Físico do *campus*, foram identificadas algumas edificações de pequeno porte, pertencentes ao Departamento de Ecologia e Biologia Evolutiva, das quais foi escolhida a que melhor atendia às necessidades da pesquisa. Assim sendo, foi projetado e construído um protótipo de cobertura verde que serviu para complementar as avaliações sobre o desempenho térmico deste sistema de cobertura.

3.2 O protótipo

3.2.1 Localização

A cidade de São Carlos, na qual está situado o experimento deste trabalho, localiza-se na região central do Estado de São Paulo, a 22° 02' S de latitude, 47° 52' W de longitude e altitude média de 840m (Figura 3.1).



Figura 3.1: Mapa de localização da cidade de São Carlos

Fonte: Adaptado de MAPA-BRASIL, 2002.

O clima da região é o tropical de altitude, que, segundo a classificação de Köppen, é o Cwa, clima quente com inverno seco, no qual a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e a do mês mais quente, ultrapassa 22°C, com verões chuvosos e invernos secos, caracterizando seis meses quentes e úmidos e seis meses frios e secos (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISAS AGROPECUÁRIAS, 2002). A precipitação pluviométrica está em torno de 1500 mm anuais (PEREZ JÚNIOR, 2002).

Conforme as Normais Climatológicas observadas entre 1961 e 1990 (BRASIL, 1992), durante oito meses do ano, entre abril e novembro, as médias mensais de umidade relativa em São Carlos permanecem abaixo de 70%. Neste mesmo período, as amplitudes médias mensais de temperaturas (diferenças entre médias de máximas e médias de mínimas) variam entre 10° e 11.8°C.

3.2.2 Descrição do protótipo

Como citado anteriormente, o protótipo de cobertura verde foi construído sobre a laje de uma edificação existente no Departamento de Ecologia e Biologia Evolutiva da Universidade Federal de São Carlos, *campus* São Carlos (Figura 3.2 e Figura 3.3).



Figura 3.2: Mapa de localização da área onde foi construído o protótipo

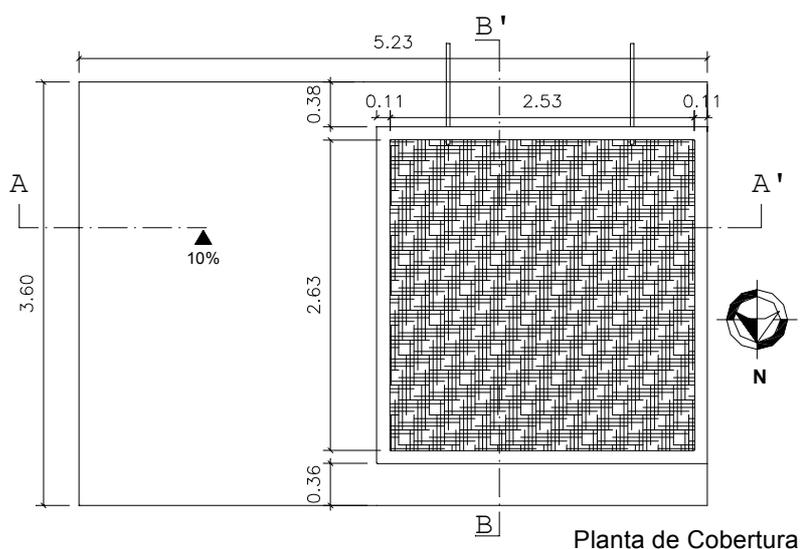
Fonte: MAPA_UFSCAR600, 2002.



Figura 3.3: Vistas frontal (esquerda) e posterior (direita) da edificação selecionada

O projeto do protótipo foi uma adaptação daquele empregado por Pouey (1998) para estudar coberturas planas de uma bancada experimental, sendo uma com vegetação em sistema extensivo e outra, tipo terraço, termicamente isolada e com piso cerâmico.

A edificação, onde foi construído o protótipo, possui dois ambientes separados, ao meio, por uma parede. O sistema construtivo é composto de alvenaria de bloco cerâmico de 8 furos e revestida com argamassa sob pintura acrílica nas vedações verticais laterais e frontal e, lajes pré-moldadas de concreto com camada de regularização em argamassa, nas vedações horizontais. A vedação posterior é composta por elementos vazados em toda sua extensão. A Figura 3.4 mostra o projeto da construção, bem como o do protótipo.



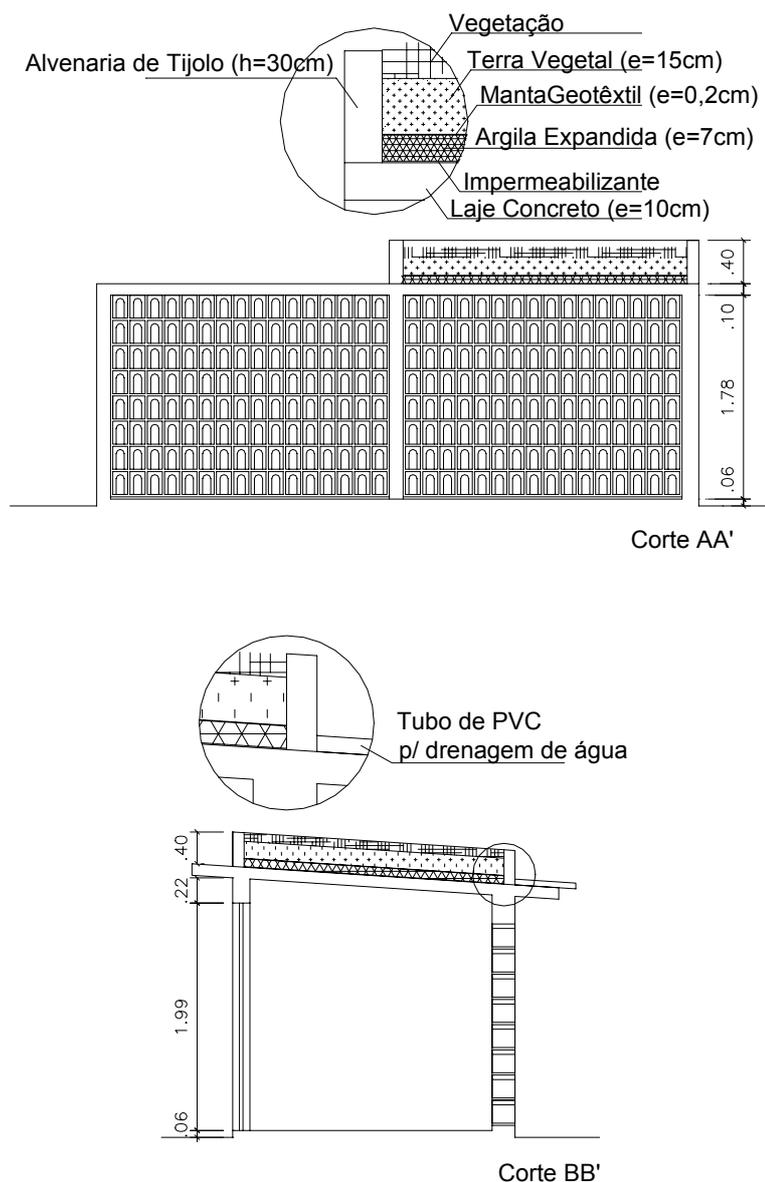


Figura 3.4: Projeto de construção do protótipo

3.2.2.1 Fases de execução

A execução do protótipo foi iniciada dia 2 e concluída dia 16 de abril de 2003, totalizando 15 dias de execução da obra.

Primeira etapa: Construção das muretas de contenção

Nesta etapa foram construídas, acima da laje, paredes de 40cm de altura e 12cm de largura, de alvenaria de tijolo cerâmico de 8 furos, rebocadas com argamassa. Posteriormente, foi colocada a tubulação para drenagem da água (Figura 3.5).



Figura 3.5: Construção das muretas de contenção

Segunda etapa: Impermeabilização

Após a construção das muretas, foram aplicadas sobre a laje e nas faces internas das muretas, duas demãos de impermeabilizante à base de asfalto diluído em solvente (Figura 3.6).



Figura 3.6: Aplicação da segunda demão de impermeabilizante

Terceira etapa: Jardinagem (Camada Drenante)

Etapa que envolveu a aplicação da camada drenante, com 7cm de espessura, composta por 500 litros de argila expandida (Figura 3.7).



Figura 3.7: Aplicação da camada drenante

Quarta etapa: Jardinagem (Camada Filtrante)

Para a camada filtrante foi utilizada uma manta geotêxtil de aproximadamente 0,2cm de espessura (Figura 3.8).



Figura 3.8: Aplicação da camada filtrante

Quinta etapa: Jardinagem (Camada de Solo)

Após a colocação da manta geotêxtil, foi aplicada uma camada de aproximadamente 12cm de terra vegetal (Figura 3.9).



Figura 3.9: Aplicação da camada de terra vegetal

Sexta etapa: Jardinagem (Vegetação)

Por fim, o plantio da vegetação, constituída por aproximadamente 6,65m² de grama tipo “esmeralda” (*Zoysia japonica*), em placas de 40 x 100cm (Figura 3.10).



Figura 3.10: Plantio da vegetação

3.2.2.2 Custos

O custo total de construção do protótipo foi de 527,70 reais, aproximadamente 80 reais por m². Cerca de 45% desse total foi destinado à mão-de-obra. A Tabela 3.1 compara os custos gerais do protótipo com aqueles obtidos nos Estados Unidos, como mencionado

no capítulo anterior. Contudo, há que se ressaltar que, normalmente, a construção de um protótipo tem um custo mais elevado do que o de construções convencionais.

Tabela 3.1: Custos gerais do protótipo comparados com preços dos Estados Unidos

Etapa	Reais por m ²	Dólares por m ²
Plantas	5	10 a 139
Instalação e mão-de-obra	40	32 a 86
Sistema de cobertura verde	80	53 a 107

A Figura 3.11 mostra o resultado final da construção do protótipo, já com as paredes internas das muretas de contenção pintadas de branco, etapa realizada depois da conclusão da etapa de jardinagem.



Figura 3.11: Vista geral do protótipo de cobertura verde

3.2.2.3 Características dos materiais

Os materiais empregados na construção do protótipo foram caracterizados quanto às suas propriedades termofísicas de acordo com a Tabela 3.2.

Tabela 3.2: Propriedades termofísicas dos materiais utilizados no protótipo

Material	Propriedades			Fonte
	λ (W/m ² °C)	ρ (kg/m ³)	c (J/kg°C)	
Terra vegetal	0.6	1800	1465	POUEY, (1998a).
Manta geotêxtil	-	100	-	POUEY, (1998a).
Argila expandida	0.07	100	1	RIVERO, (1985, p. 177).
Impermeabilizante	-	900	-	NEUTROL,... (2003)
Laje pré-moldada de concreto	1.130	2000	1000	ZOLD; SZOKOLAY, (1997).

Condutividade térmica: λ ; Massa específica: ρ ; Calor específico: c

3.3 Material utilizado nos monitoramentos

Para monitorar as condições higrotérmicas ambientais, foi adotado um sistema eletrônico de aquisição de dados, constituído por aparelhos registradores de temperatura e umidade relativa do ar e temperatura superficial, modelo HOBO® (Figura 3.12), fabricado nos Estados Unidos pela empresa “ONSET Computer Corporation”.



Figura 3.12: Aparelhos registradores HOBO® utilizados nos monitoramentos

Fonte: H08FAMILY, 2002.

Esses aparelhos são programáveis em intervalos de tempo pré-fixados, por intermédio do programa BoxCar® Pro. O sistema apresenta precisão e capacidade de armazenamento de dados satisfatórias, cujos campos de medições de temperatura e umidade relativa do ar são de -20° a 70°C , com resolução de $\pm 0,38^{\circ}$ a 21°C e de 25 a 95%, com resolução de $\pm 5\%$, respectivamente (HOBO®, 2002).

O sistema oferece ainda, por meio do HOBO® Shuttle Data Transporter (Figura 3.13), a conveniência de coletar e transmitir, para o computador, dados dos aparelhos, ainda instalados e operando, sem que o monitoramento seja interrompido. Esse recurso contribuiu para verificar se os aparelhos estavam funcionando de acordo com o que tinha sido programado.



Figura 3.13: Aparelho utilizado para verificação dos registradores de dados

Fonte: HOBOSHUTTLE, 2003.

Em medições pilotos, foi constatado que esses instrumentos são extremamente sensíveis às radiações térmicas, mesmo em ambientes internos. De modo a evitar interferências que prejudicassem a identificação das variáveis medidas, os aparelhos foram posicionados estrategicamente à sombra e no interior de recipientes de alumínio, estes com pequenas aberturas que permitissem a livre circulação do ar (Figura 3.14).



Figura 3.14: Proteções utilizada nos aparelhos registradores

As variáveis medidas foram as seguintes:

T_{bs} (°C): Temperaturas do ar interno e externo ao protótipo;

SupInt (°C): Temperatura superficial interna das lajes;

UR (%): Umidade relativa do ar.

Os dados de temperatura superficial interna das lajes foram obtidos mediante sensor externo (conectado diretamente no HOBO®) com ponta de aço inoxidável e a prova d'água, com campo de medição de -40° a 100°C e resolução de $\pm 0,5^{\circ}$ a 20°C (HOBO®, 2002). Para melhorar o contato e eliminar o ar entre o sensor e a laje, o mesmo foi fixado em uma placa de poliestireno expandido (isopor) de 11x11cm e 3cm de espessura, com pasta térmica (Figura 3.15). A fita adesiva na placa de isopor serve apenas para prender o cabo, mas não cobre a ponta de aço, a mesma é coberta somente pela pasta térmica.



Figura 3.15: Sensor utilizado para medir temperatura superficial

Os dados climáticos mensais, bem como os de radiação solar e de ventos, foram obtidos junto à estação climatológica do Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada – CRHEA, da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2003a).

3.4 Jardim 1.0 – Temperaturas Superficiais em Vegetação

Os dados referentes às temperaturas superficiais externas das lajes foram estimados por intermédio do programa Jardim 1.0 – Temperaturas Superficiais em Vegetação (RORIZ, 2003), que adota um modelo de cálculo baseado no método de Penman-Monteith, cuja equação determina a taxa de evapotranspiração da água em plantas e no solo.

De acordo com Roriz (2003), a temperatura superficial externa da laje comum é estimada a partir da temperatura ar-sol de uma laje sem vegetação, de cor média, com uma absorvância de 0.6, submetida às mesmas condições que a cobertura com vegetação, ao passo que a temperatura da superfície de folhas da grama é estimada por equações baseadas na temperatura do ar externo (TBS) (°C), na resistência ao fluxo turbulento (ra) (s/m), na radiação líquida (RLiq) (W/m²), na energia de evaporação (EnEvp) (W/m²) e no produto entre a densidade e o calor específico do ar (Tabela 3.3).

Tabela 3.3: Variáveis calculadas pelo programa Jardim1.0

Fonte: RORIZ, 2003.

Variável	Equação	Unidade
PVS - Pressão de Vapor Saturante	$PVS=6.11\text{Exp}[(17.27Tbs)/(Tbs+237.31)]$	hPa
PVP – Presão de Vapor	$PVP=(UR/100) PVS$	hPa
DPS - Declividade da curva de Pressão Saturante	$DPD = 4098.17PVS/[(Tbs+237.3)2]$	HPa/K
Kt – Índice de limpeza atmosférica	$Kt=Rad/ET$	-
RL – Radiação em ondas Longas	$RL=5.67E-8(TK4)[0.56-0.08(PVP0.5)](1.35Kt-0.35)$	W/m ²
RLiq – Radiação Líquida	$RLiq=[Rad(1-Albedo)]-RL$	W/m ²
LAI – Índice de Área Foliar	$LAI=-2.984+N1+N2$	-
ra – Resistência Aerodinâmica ao fluxo turbulento	$ra=[\{Ln[(Hven-(0.63Hveg)/0.13Hveg)]\}2]/0.1681Ve/Ven$	s/m
rv – Resistência Superficial ao fluxo de Vapor	$rv=200/LAI$	s/m
CLV - Calor Latente de Vaporização	$CLV=2.50326-0.00242Tbs$	MJ/kg
EnEvp – Energia de Evaporação	$EnEvp=N1/N2$	W/m ²
TxEvp – Taxa de Evaporação	$TxEvp=0.0036EnEvp/CLV$	W/m ²
TSA – Temperatura Sol-Ar	TSA=estimativa da temperatura que ocorreria na superfície externa da laje comum	°C
TsV – Temperatura Superficial da Vegetação	$TsV=Tbs+ra(RLiq-EnEvp)/1209.52$	°C

3.4.1 Dados de entrada – valores medidos

Inicialmente, os arquivos necessários ao programa, para que o mesmo estimasse as temperaturas superficiais externas em ambas as coberturas, foram gerados com base nos dados registrados pela estação climatológica do CRHEA (irradiância global e velocidade do vento) e pelas medições no protótipo (temperatura do ar externo e umidade relativa).

Contudo, após os alguns testes, foi verificada uma certa sensibilidade das equações de cálculo do programa para dados de velocidade de vento e umidade relativa do ar. Alguns resultados mostraram-se ilógicos quando inseridos dados de velocidade de vento menores que 1.0m/s, como àqueles registrados pela estação climatológica do CRHEA, cuja média diária, durante os períodos de medições, não ultrapassou 0.5m/s.

Sendo assim, para efeito de estimativa e uniformização das análises, foram adotados os dados de velocidade do vento e irradiância solar, registrados pela estação climatológica situada à Escola de Engenharia de São Carlos (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2003b), localizada na região central da cidade de São Carlos, cujas condições climáticas se assemelhavam mais àquelas a que estava submetido o protótipo. Uma justificativa para tanto, é o fato de a UFSCar e a EESC-USP serem mais próximas uma da outra do que UFSCar e CRHEA.

De acordo com o arquivo de dados (Anexo E), o programa calcula os valores das variáveis apresentadas na Tabela 3.3 e gera dois tipos de gráfico: um com as curvas de temperaturas do ar e superficiais externas nas duas coberturas e, outro, com as curvas de irradiações extraterrestre, global, de onda longa, líquida e energia de evaporação. As equações, melhor explicadas, e suas respectivas referências são apresentadas no próprio programa.

3.5 Medições

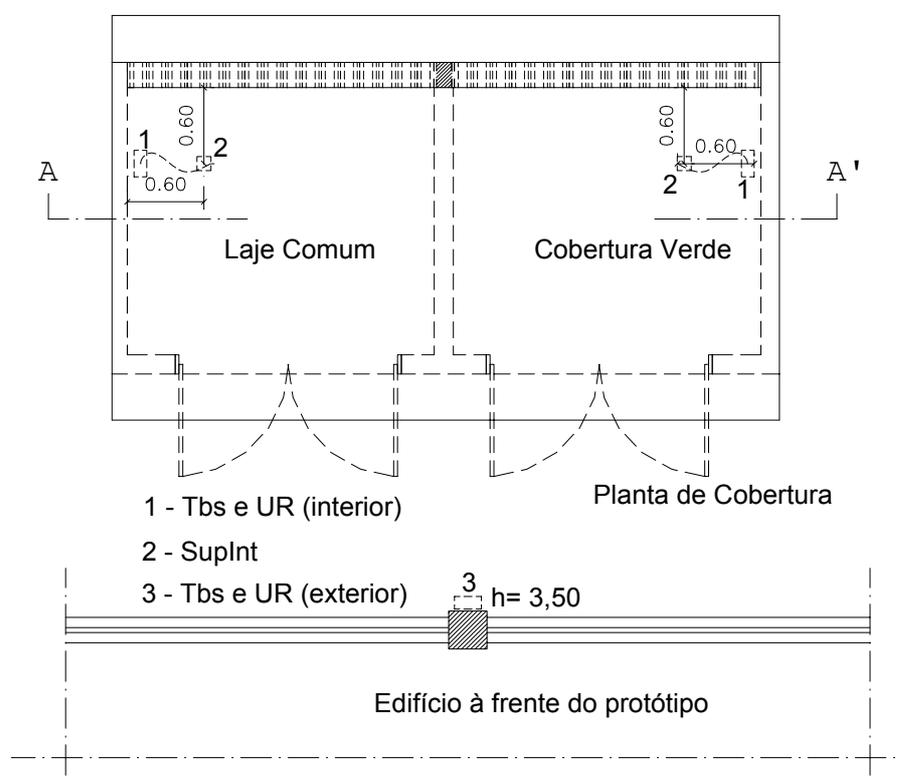
Após o treinamento no uso e instalação dos aparelhos registradores, as medições foram iniciadas. Estas foram realizadas em dois períodos durante o ano de 2003, sendo nos meses de maio e junho, para situação de inverno e, outubro, para situação de verão. Apesar de o verão se iniciar somente em dezembro, o mês de outubro foi tomado como situação de verão devido, principalmente, aos prazos exíguos destinados à conclusão da etapa de medições.

3.5.1 Medições de inverno

Os dados referentes à situação de inverno foram registrados nos períodos de 15 de maio a 01 de junho (18 dias) e de 5 a 12 (8 dias) de junho de 2003.

A fim de obter dados relativos à evolução térmica das lajes, os aparelhos registradores foram programados para realizar varreduras de temperatura do ar interno e externo à edificação, umidade relativa do ar e temperatura superficial interna das lajes, a cada 10 minutos, 24 horas por dia.

Para obtenção dos dados internos à edificação, as variáveis ambientais foram medidas em um ponto de cada cobertura. Os aparelhos foram instalados em dois conjuntos formados, cada um deles, por um registrador de temperatura e umidade relativa do ar, inserido no recipiente de alumínio, e de temperatura superficial, obtida com o cabo sensor instalado nas faces internas das lajes. Os dados externos de temperatura e umidade relativa do ar foram obtidos a partir de um aparelho, inserido no recipiente de alumínio, instalado no edifício à frente do protótipo como mostra a Figura 3.16.



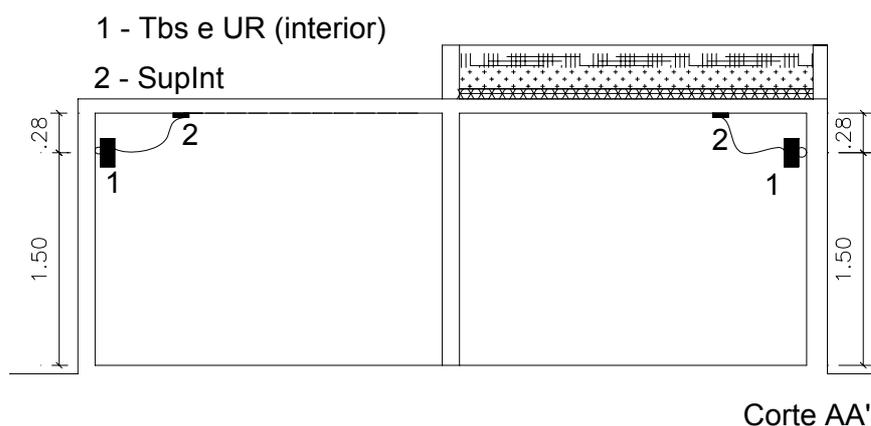


Figura 3.16: Posicionamento dos aparelhos no protótipo durante as medições de inverno

Após a leitura das medições ambientais preliminares, realizadas no período de 15 de maio a 01 de junho, foi constatado que a temperatura superficial interna da laje com cobertura verde não foi registrada. Acredita-se que tenha ocorrido uma má conexão entre o cabo do sensor e o aparelho registrador. Sendo assim, o período de 05 a 12 de junho ficou estipulado como o das medições efetivas para situação de inverno.

3.5.2 Medições de verão

Os dados referentes à situação de verão foram registrados no período de 15 a 22 de outubro de 2003, totalizando 8 dias de monitoramentos.

Assim como nas medições de inverno, os aparelhos registradores foram programados para realizar varreduras de temperatura do ar interno e externo à edificação, umidade relativa do ar e temperatura superficial interna das lajes, a cada 10 minutos, 24 horas por dia.

Tendo em vista que os resultados de medições de temperaturas e umidades do ar, no interior de uma edificação, podem sofrer influências de fatores como ventilação, fontes internas de calor, fachadas, aberturas, fechamentos, etc, nessa etapa de medições optou-se por utilizar um sistema de isolamento constituído por duas caixas de poliestireno expandido (EPS), com espessuras de 30mm (caixa externa) e 22mm (caixa interna), formando-se uma câmara de ar entre elas (Figura 3.17).

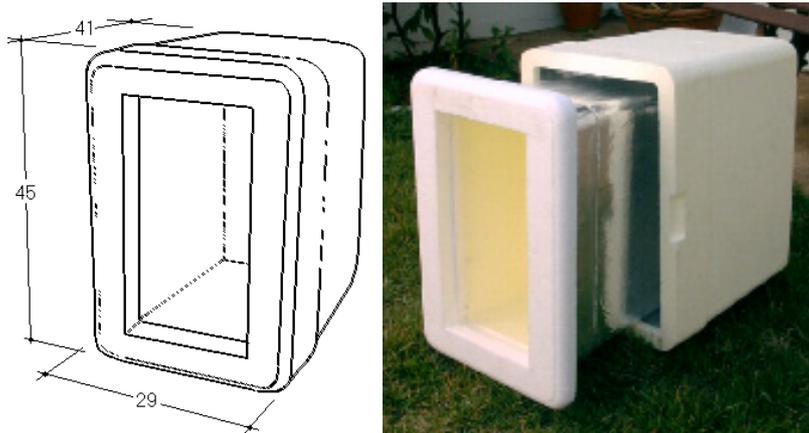


Figura 3.17: Sistema de isolamento térmico utilizado nas medições de verão

O uso das caixas térmicas permitiu identificar os efeitos da cobertura, evitando, assim, as interferências desses fatores. Para elevar a resistência térmica da câmara de ar, as superfícies que a delimitam foram revestidas com película de alumínio brilhante, com emissividade estimada de 0.05.

As faces interna e externa do conjunto de caixas foram protegidas por manta aluminizada, também de baixa emissividade. Considerando-se a posição de uso da caixa e os valores correspondentes aos fluxos das áreas da câmara de ar, foi possível estimar, para a mesma, uma resistência térmica média de $2,286 \text{ m}^2 \cdot \text{K/W}$.

Para obtenção dos dados internos à edificação, as variáveis ambientais foram medidas em um ponto de cada laje. Os aparelhos foram instalados em dois conjuntos formados, cada um deles, por um registrador de temperatura e umidade relativa do ar, inserido no recipiente de alumínio e, um outro, para registrar a temperatura superficial interna, que foi inserido na caixa térmica, a qual foi mantida pressionada contra a laje por meio de elásticos e hastes de ferro (Figura 3.18).

Os dados externos de temperatura e umidade relativa do ar foram obtidos por meio de um aparelho, inserido no recipiente de alumínio, que foi instalado no edifício à frente do protótipo como mostra a Figura 3.18.

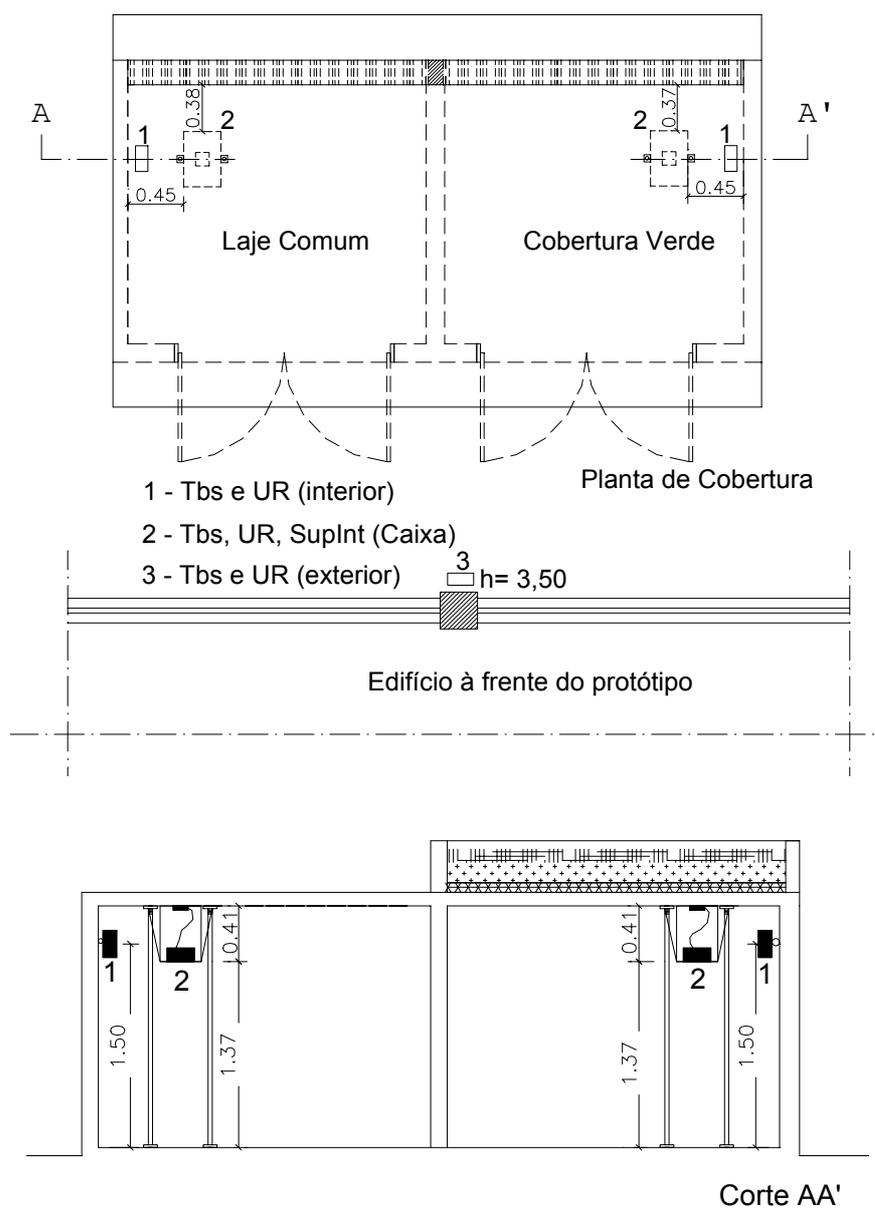


Figura 3.18: Posicionamento dos aparelhos no protótipo durante as medições de verão

3.6 Tratamento estatístico dos dados

De modo a permitir conclusões sobre os desempenhos térmicos dos sistemas de coberturas enfocados, o tratamento estatístico dos dados deste trabalho, adotado em virtude do grande conjunto dos mesmos, teve por fim efetuar análises comparativas entre os dados obtidos com as medições; àqueles estimados pelo programa Jardim 1.0 e os resultados dessas duas análises.

A maioria das tabelas apresentada no capítulo seguinte, Resultados e Discussão, refere-se aos valores extremos (máximo (Max) e mínimo (Min)) das variáveis obtidas por meio das medições e das estimativas e às diferenças entre elas, bem como as médias desses valores.

Ao longo de todo o capítulo seguinte, para designar dados referentes às variáveis, medidas e estimadas, relativas às duas coberturas estudadas, foi utilizada a seguinte terminologia:

TbsMax: temperatura máxima do ar externo (°C)

TbsMin: temperatura mínima do ar externo (°C)

URMax: umidade relativa máxima do ar externo (%)

URMin: umidade relativa mínima do ar externo (%)

Irrad.EESC: irradiância global (W/m^2) na Estação Climatológica da Escola de Engenharia de São Carlos

LC: laje comum

TbsExtMax: temperatura máxima do ar externo ao protótipo (°C)

TbsExtMin: temperatura mínima do ar externo ao protótipo (°C)

TbsMaxLC: temperatura máxima do ar interno ao ambiente com laje comum (°C)

TbsMinLC: temperatura mínima do ar interno ao ambiente com laje comum (°C)

SupIntMaxLC: temperatura superficial interna máxima da laje comum (°C)

SupIntMinLC: temperatura superficial interna mínima da laje comum (°C)

SupExtMaxLC: temperatura superficial externa máxima da laje comum (°C)

SupExtMinLC: temperatura superficial externa mínima da laje comum (°C)

Δ TbsMaxLC: $TbsExtMax - TbsMaxLC$ (°C)

Δ TbsMinLC: $TbsMinLC - TbsExtMin$ (°C)

Δ SupIntMaxLC: $TbsExtMax - SupIntMaxLC$ (°C)

Δ SupIntMinLC: $SupIntMinLC - TbsExtMin$ (°C)

Δ SupExtMaxLC: $TbsExtMax - SupExtMaxLC$ (°C)

Δ SupExtMinLC: $SupExtMinLC - TbsExtMin$ (°C)

CV: cobertura verde

TbsMaxCV: temperatura máxima do ar interno ao ambiente com cobertura verde (°C)

TbsMinCV: temperatura mínima do ar interno ao ambiente com cobertura verde (°C)

SupIntMaxCV: temperatura superficial interna máxima da cobertura verde (°C)

SupIntMinCV: temperatura superficial interna mínima da cobertura verde (°C)

SupExtMaxCV: temperatura superficial máxima nas folhas da cobertura verde (°C)

SupExtMinCV: temperatura superficial mínima nas folhas da cobertura verde (°C)

$\Delta\mathbf{TbsMaxCV}$: TbsExtMax – TbsMaxCV (°C)

$\Delta\mathbf{TbsMinCV}$: TbsMinCV – TbsExtMin (°C)

$\Delta\mathbf{SupIntMaxCV}$: TbsExtMax – SupIntMaxCV (°C)

$\Delta\mathbf{SupIntMinCV}$: SupIntMinCV – TbsExtMin (°C)

$\Delta\mathbf{SupExtMaxCV}$: TbsExtMax – SupExtMaxCV (°C)

$\Delta\mathbf{SupExtMinCV}$: SupExtMinCV – TbsExtMin (°C)

$\Delta\mathbf{TbsMax}$: TbsMaxLC – TbsMaxCV (°C)

$\Delta\mathbf{TbsMin}$: TbsMinLC – TbsMinCV (°C)

$\Delta\mathbf{SupIntMax}$: SupIntMaxLC – SupIntMaxCV (°C)

$\Delta\mathbf{SupIntMin}$: SupIntMinLC – SupIntMinCV (°C)

$\Delta\mathbf{SupExtMax}$: SupExtMaxLC – SupExtMaxCV (°C)

$\Delta\mathbf{SupExtMin}$: SupExtMinLC – SupExtMinCV (°C)

4 Resultados e Discussão

Este capítulo apresenta, além dos dados obtidos com os monitoramentos, as análises estatísticas das variáveis medidas, bem como a avaliação e discussão dos desempenhos térmicos das coberturas estudadas, em situação de inverno e de verão.

4.1 Desempenho térmico de inverno

Os dados experimentais de inverno, apresentados neste trabalho, fazem referência aos oito dias da semana de 5 a 12, do mês de junho de 2003. Os dados climáticos registrados pela estação climatológica da Escola de Engenharia de São Carlos (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2003b), para o mês de junho de 2003, quando comparados com os das Normais Climatológicas observadas entre 1961 e 1990 (BRASIL, 1992), apresentaram valores de mês seco e com poucas chuvas (Tabela 4.1).

Tabela 4.1: Dados climatológicos do mês junho da estação da EESC e das Normais

Variáveis	EESC	Normais
	jun/03	
Temperatura Média Máxima (°C)	29,0	22,7
Temperatura Média (°C)	19,2	16,7
Temperatura Média Mínima (°C)	7,8	12,0
Umidade Relativa (%)	68,6	66,0
Precipitação Pluviométrica (mm)	35,1	40,0
Número de dias chuvosos	3	-
Irradiância solar global (W/m ²)	170,7	95
Insolação (horas)	-	120,1

Em relação aos valores das Normais, os dados de precipitação pluviométrica e temperatura média mínima apresentaram valores inferiores, enquanto que os de irradiância solar global, temperatura média máxima e umidade relativa foram superiores. A Tabela 4.1 apresenta alguns desses dados médios mensais.

4.1.1 Dados climáticos

As condições climáticas da semana de 5 a 12 de junho de 2003 apresentaram-se constantes, com dias claros e secos e temperaturas do ar (Tbs em °C) e umidades relativas (UR em %) características para a época, cujas máximas e mínimas absolutas na estação climatológica da EESC e na área externa ao protótipo, podem ser constatadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Temperaturas e umidades relativas do ar registradas de 5 a 12 de junho de 2003

Fonte: Estação climatológica da EESC e dados medidos in loco

	TbsMax (°C)	TbsMin (°C)	URMax (%)	URMin (%)
EESC	29,0	12,9	95,9	37,9
Protótipo	25,2	13,7	100	49,9

A diferença de 3.8°C, entre as temperaturas máximas do ar (TbsMax) registradas na estação climatológica da EESC e na UFSCar (protótipo), pode ter se dado devido a fatores como as maiores altitude e áreas arborizadas da UFSCar, que contribuem para ocorrência de temperaturas mais baixas.

A Tabela 4.3 apresenta os dados climáticos que caracterizaram cada dia da semana de 5 a 12 de junho de 2003 registrados pela estação climatológica da EESC.

Tabela 4.3: Dados climáticos de 5 a 12 de junho registrados pela estação climatológica - EESC

Variáveis	Dia							
	5	6	7	8	9	10	11	12
Temperatura Máxima (°C)	25,8	27,6	29,0	28,5	27,4	26,8	26,5	27,4
Temperatura Média (°C)	20,0	22,0	22,0	20,3	21,0	21,2	20,4	19,3
Temperatura Mínima (°C)	16,8	18,3	15,8	16,0	16,4	16,8	15,2	12,9
Umidade Relativa (%)	84,9	76,6	73,0	81,7	76,5	67,9	67,6	70,0
Precipitação Pluviométrica (mm)	0,1	0,0	0,0	0,6	0,0	0,0	0,0	0,0
Irradiância solar global (W/m ²)	99,1	159,8	182,8	149,5	172,5	182,6	175,4	180,4
Velocidade do vento (m/s)	0,5	0,4	0,2	0,5	0,6	0,7	0,7	0,2
Direção do vento (graus)	118,7	226,8	218,9	117,3	152,5	203,0	228,1	213,7

Os gráficos da Figura 4.1 mostram as curvas de evolução das temperaturas e umidades relativas do ar, na estação climatológica da EESC e no protótipo, durante a semana de 5 a 12 de junho de 2003. A Figura 4.2 apresenta a irradiância solar global registrada na estação climatológica da EESC, no mesmo período.

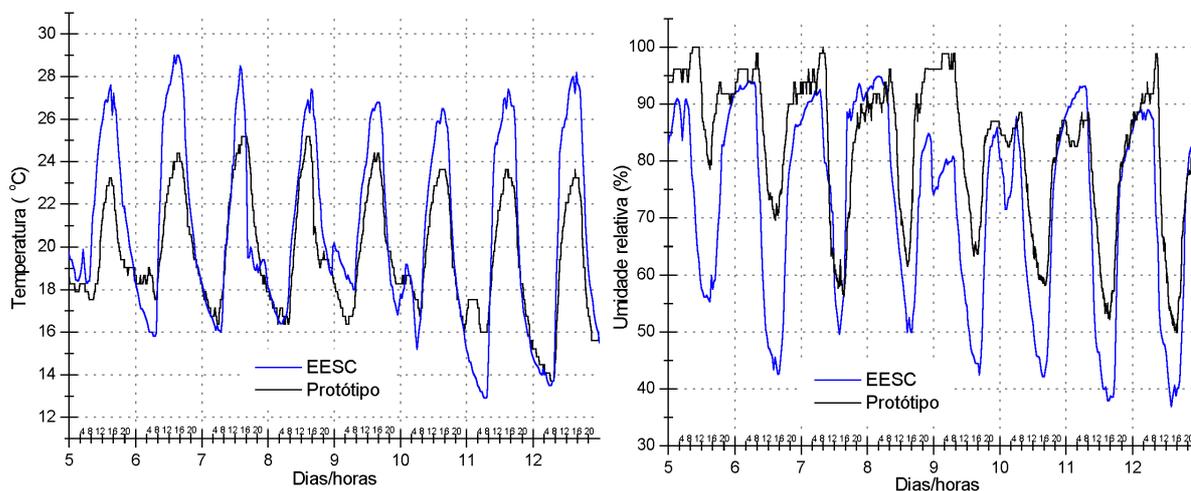


Figura 4.1: Temperaturas e umidades relativas do ar registradas na estação climatológica da EESC e no protótipo durante a semana de 5 a 12 de junho de 2003

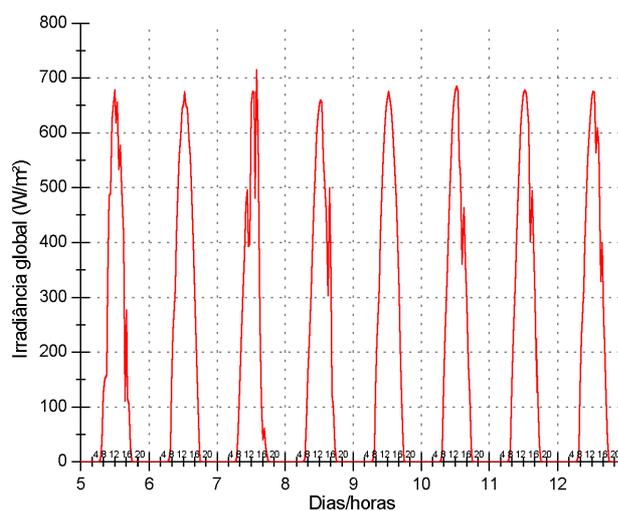


Figura 4.2: Irradiância global registrada na estação climatológica da EESC durante a semana de 5 a 12 de junho de 2003

4.1.2 Dados do protótipo: Laje Comum - LC

4.1.2.1 Temperaturas do ar e superficiais

Os dados de temperatura do ar (TbsExt e TbsLC) (°C) e temperatura superficial interna (SupIntLC) (°C), registrados no protótipo com laje comum – LC, e os de temperatura superficial externa (SupExtLC) (°C) (estimada pelo Jardim 1.0) são mostrados na Figura 4.3. A Tabela 4.4 resume os valores de máximas e mínimas dessas mesmas temperaturas.

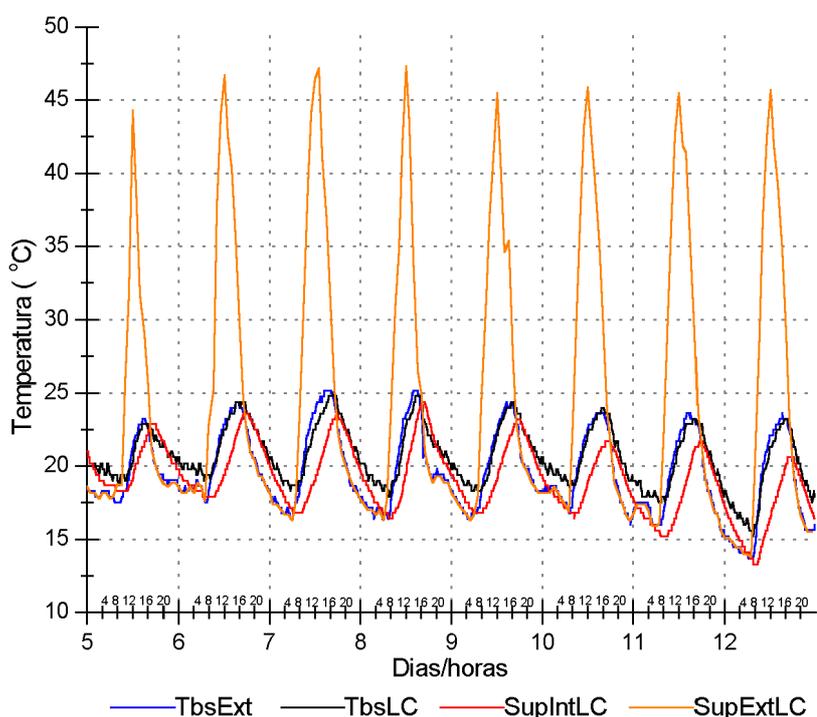


Figura 4.3: Temperaturas do ar e superficiais no protótipo com laje comum – LC

Tabela 4.4: Máximas e mínimas de temperaturas do ar e superficiais na laje comum - LC

Dia	TbsExtMax (°C)	TbsExtMin (°C)	TbsMax LC (°C)	TbsMin LC (°C)	SupIntMax LC (°C)	SupIntMin LC (°C)	SupExtMax LC (°C)	SupExtMin LC (°C)
5	23,2	17,5	22,9	18,7	22,9	18,3	44,3	17,8
6	24,4	17,5	24,4	19,0	23,6	17,9	46,7	17,6
7	25,2	16,4	25,2	18,3	23,6	16,8	47,2	16,3
8	25,2	16,4	24,8	17,9	24,4	16,4	47,3	16,3
9	24,4	16,4	24,4	18,3	23,2	16,8	45,5	16,3
10	23,6	16,0	24,0	18,3	21,7	16,4	45,9	16,3
11	23,6	15,2	23,2	17,5	21,7	15,2	45,5	15,5
12	23,6	13,7	23,2	15,2	20,6	13,3	45,7	13,8
Médias	24,2	16,1	24,0	17,9	22,7	16,4	46,0	16,2

A Tabela 4.5 apresenta as diferenças (Δ) ($^{\circ}\text{C}$) das temperaturas máximas e mínimas do ar e superficiais do protótipo com laje comum, calculadas em relação às temperaturas do ar externo.

Tabela 4.5: Diferenças entre máximas e mínimas das temperaturas do ar e superficiais - LC

Dia	$\Delta\text{TbsMax LC}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{TbsMin LC}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{SupIntMax LC}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{SupIntMin LC}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{SupExtMax LC}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{SupExtMin LC}$ ($^{\circ}\text{C}$)
5	0,4	1,1	0,4	0,8	-21,1	0,3
6	0,0	1,5	0,8	0,4	-22,7	0,1
7	0,0	1,9	1,5	0,4	-22,0	-0,1
8	0,4	1,5	0,8	0,0	-22,1	-0,1
9	0,0	1,9	1,2	0,4	-21,1	-0,1
10	-0,4	2,3	1,9	0,4	-22,3	-0,1
11	0,4	2,3	1,9	0,0	-22,3	-0,1
12	0,4	1,5	3,1	-0,4	-22,5	0,1
Médias	0,3	1,8	1,4	0,4	-22,0	0,1

A Tabela 4.6 mostra os atrasos térmicos (φ), em horas (h), de máximas e mínimas das temperaturas internas e externas ao protótipo com laje comum, calculados em relação à temperatura do ar externo.

Tabela 4.6: Atrasos térmicos de máximas e de mínimas do protótipo com laje comum – LC

Dia	Atraso Térmico (φ) (h)					
	TbsMax LC	TbsMin LC	SupIntMax LC	SupIntMin LC	SupExtMax LC	SupExtMin LC
5	0,17	1,16	2,00	0,33	2,67	4,17
6	0,17	0,17	1,83	0,67	3,17	0,00
7	2,50	0,00	3,00	0,67	1,50	0,50
8	0,67	3,83	2,17	3,66	1,83	2,33
9	1,50	1,00	2,84	1,34	2,33	0,67
10	1,33	16,00	2,50	14,83	2,17	0,33
11	1,50	16,66	3,00	16,16	2,17	0,33
12	0,33	1,16	1,50	1,33	3,17	0,83
Médias	1,02	5,00	2,36	4,87	2,37	1,14

Observando os dados da Figura 4.3 e da Tabela 4.4 à Tabela 4.6, percebe-se que as temperaturas do ar interno à edificação não sofreram variações diárias significativas. Isto pode ter ocorrido devido à grande área de elementos vazados da parede posterior da edificação, como ilustrado no capítulo anterior. A temperatura do ar externo (TbsExt) atingiu valores máximo e mínimo de $25,2^{\circ}\text{C}$ às 14:30h do dia 7 e, $13,7^{\circ}\text{C}$ às 6:10h do dia 12, respectivamente, com amplitude térmica média de $8,1^{\circ}\text{C}$.

A temperatura do ar interno ao protótipo com laje comum (TbsLC) alcançou seu valor máximo de $25,2^{\circ}\text{C}$, igualando-se à temperatura do ar externo, às 17:00h do dia 7, e mínimo de $15,2^{\circ}\text{C}$, às 7:20h do dia 12, com amplitude térmica média de $6,1^{\circ}\text{C}$. Comparada com a

temperatura do ar externo, as diferenças de temperatura variaram de 0 a 2,3°C e os atrasos térmicos, de máximas e mínimas, foram de 2,50 e 1,16 horas, respectivamente.

A temperatura superficial interna (SupIntLC) atingiu os valores máximo e mínimo de 24,4°C, dia 8 às 16h, e de 13,3°C dia 12 às 7:30h, respectivamente. A amplitude térmica média foi de 6,3°C e os atrasos de máximas e mínimas, de 25,50 e 1,33 horas, respectivamente. As diferenças de temperatura variaram de 0 a 3,1°C. O coeficiente médio de amortecimento térmico (μ) da laje comum, calculado por meio das temperaturas do ar externo e superficiais internas, foi de 2,66.

De acordo com gráfico da Figura 4.3 e os valores da Tabela 4.4 à Tabela 4.6, os valores extremos, estimados, da temperatura superficial externa da laje comum (SupExtLC) variaram de 13,8°C a 47,3°C, com amplitude térmica média de 29,8°C. Em relação à temperatura do ar externo, as diferenças de temperatura variaram de 0,8 a 22,7°C.

4.1.3 Dados do protótipo: Cobertura Verde – CV

4.1.3.1 Temperaturas do ar e superficiais

Os dados de temperatura do ar (TbsExt e TbsCV) e temperatura superficial interna (SupIntCV), registrados no protótipo com cobertura verde – CV, e os de temperatura da superfície de folhas (SupExtCV) (estimada) são mostrados na Figura 4.4. A Tabela 4.7 resume os valores de máximas e mínimas dessas mesmas temperaturas.

Tabela 4.7: Máximas e mínimas de temperaturas do ar e superficiais na cobertura verde - CV

Dia	TbsExtMax (°C)	TbsExtMin (°C)	TbsMax CV (°C)	TbsMin CV (°C)	SupIntMax CV (°C)	SupIntMin CV (°C)	SupExtMax CV (°C)	SupExtMin CV (°C)
5	23,2	17,5	22,1	18,3	20,2	19,0	31,4	16,5
6	24,4	17,5	23,6	18,7	21,0	19,0	29,6	14,9
7	25,2	16,4	24,0	18,3	21,0	19,0	30,5	13,2
8	25,2	16,4	24,0	17,9	20,6	18,7	32,5	13,7
9	24,4	16,4	23,6	17,9	20,6	18,7	28,0	14,0
10	23,6	16,0	23,2	18,3	20,2	18,7	26,5	12,3
11	23,6	15,2	22,9	17,5	19,8	17,9	26,3	11,1
12	23,6	13,7	22,9	15,6	19,0	16,8	30,3	9,9
Médias	24,2	16,1	23,3	17,8	20,3	18,5	29,4	13,2

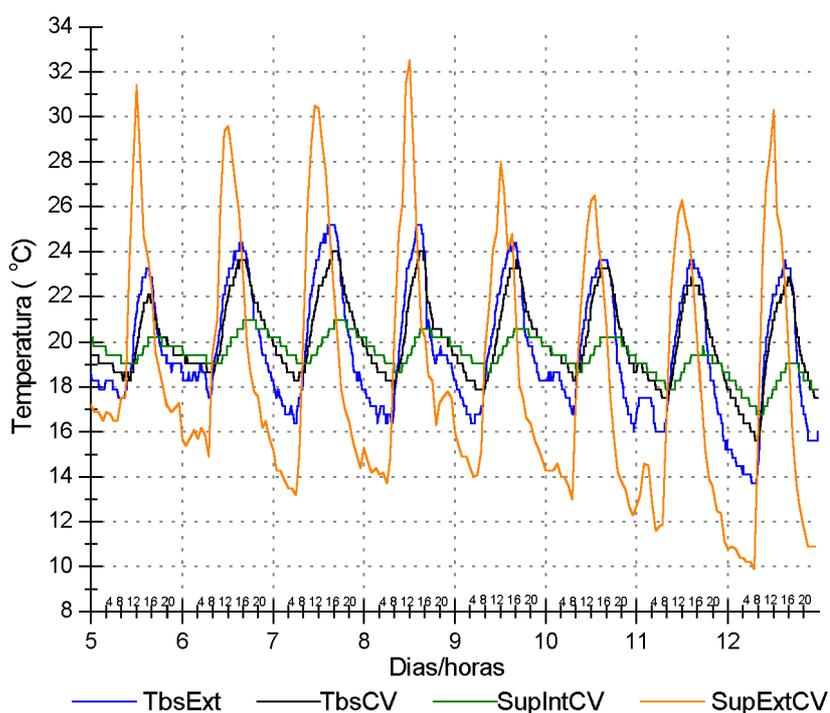


Figura 4.4: Temperaturas do ar e superficiais no protótipo com cobertura verde – CV

A Tabela 4.8 apresenta as diferenças (Δ) ($^{\circ}\text{C}$) das temperaturas máximas e mínimas do ar e superficiais do protótipo de cobertura verde, calculadas em relação às temperaturas do ar externo.

Tabela 4.8: Diferenças entre máximas e mínimas das temperaturas do ar e superficiais - CV

Dia	$\Delta\text{TbsMax CV}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{TbsMin CV}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{SupIntMax CV}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{SupIntMin CV}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{SupExtMax CV}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{SupExtMin CV}$ ($^{\circ}\text{C}$)
5	1,2	0,8	3,1	1,5	-8,2	-1,0
6	0,8	1,1	3,5	1,5	-5,6	-2,6
7	1,2	1,9	4,2	2,7	-5,3	-3,2
8	1,2	1,5	4,6	2,3	-7,3	-2,7
9	0,8	1,5	3,8	2,3	-3,6	-2,4
10	0,4	2,3	3,4	2,7	-2,9	-4,1
11	0,8	2,3	3,8	2,7	-3,1	-4,5
12	0,8	1,9	4,6	3,1	-7,1	-3,8
Médias	0,9	1,7	3,9	2,3	-5,4	-3,0

A Tabela 4.9 mostra os atrasos térmicos (φ), em horas (h), de máximas e mínimas das temperaturas internas e externas ao protótipo com cobertura verde, em relação à temperatura do ar externo.

Tabela 4.9: Atrasos térmicos de máximas e de mínimas do protótipo cobertura verde – CV

Dia	Atraso Térmico (ϕ)					
	TbsMax CV	TbsMin CV	SupIntMax CV	SupIntMin CV	SupExtMax CV	SupExtMin CV
5	0,33	1,16	0,50	0,83	2,67	4,17
6	0,50	0,50	1,00	0,67	3,17	0,00
7	1,17	0,00	1,67	0,00	3,50	0,50
8	0,84	3,83	1,00	4,33	1,83	2,33
9	1,84	1,17	1,17	3,50	2,33	0,33
10	0,33	16,16	0,33	14,50	1,17	0,33
11	0,33	16,66	3,16	15,66	2,17	0,33
12	0,66	1,00	0,16	1,33	3,17	0,83
Médias	0,75	5,06	1,12	5,10	2,50	1,10

Analisando os dados da Tabela 4.7 à Tabela 4.9 e a Figura 4.4, percebe-se que, entre as curvas de temperaturas mostradas, a que se mostrou mais estável foi a da temperatura superficial interna da laje com cobertura verde (SupIntCV).

A temperatura do ar no interior do protótipo com cobertura verde (TbsCV) alcançou o valor máximo de 24,0°C às 15:40h do dia 7, e mínimo de 15,6°C, às 7:10h do dia 12, gerando uma amplitude térmica média de 5,5°C. As diferenças entre temperaturas do ar internas e externas variaram de 0,8 a 2,3°C. Os atrasos térmicos de máximas e mínimas foram de 1,17 horas e 1 hora, respectivamente.

A temperatura superficial interna (SupInt CV) atingiu valores máximo e mínimo de 21,0°C, dia 6 às 16:20h, e 16,8°C dia 12 às 7:30h, respectivamente, com uma amplitude térmica média de 1,8°C. Em relação à temperatura do ar externo, o atraso térmico de mínimas foi de 1,33 horas, enquanto a máxima temperatura superficial interna da cobertura verde (SupIntMaxCV) ocorreu com uma defasagem de 22,33 horas e as diferenças de temperatura variaram de 1,5 a 4,6°C. O coeficiente médio de amortecimento térmico (μ) da cobertura verde, calculado por meio das temperaturas do ar externo e superficiais internas, foi de 0,21.

De acordo com gráfico da Figura 4.4 e os dados da Tabela 4.7 à Tabela 4.9, os valores extremos, estimados, da temperatura superficial da grama (SupExtCV) variaram de 9,9 a 31,4°C, com amplitude térmica média de 16,2°C. Em relação à temperatura do ar externo, as diferenças de temperatura variaram de 1 a 8,2°C.

4.1.4 Comparação entre laje comum e cobertura verde: LC x CV

As comparações foram feitas com base no período total de medições (semana de 5 a 12 de junho) e nos valores médios diários de cada temperatura.

4.1.4.1 Temperaturas do ar

A Figura 4.5 e a Figura 4.6 comparam, respectivamente, o comportamento das curvas de temperaturas do ar interno e externo aos ambientes de cada cobertura durante todo o período de medições e seus valores médios diários. Na Tabela 4.10 e na Tabela 4.11, respectivamente, são mostrados os valores máximos e mínimos das temperaturas do ar interno aos ambientes e as diferenças entre eles.

Tabela 4.10: Máximas e mínimas das temperaturas do ar na LC e na CV

Dia	TbsMax LC (°C)	TbsMin LC (°C)	TbsMax CV (°C)	TbsMin CV (°C)
5	22,9	18,7	22,1	18,3
6	24,4	19,0	23,6	18,7
7	25,2	18,3	24,0	18,3
8	24,8	17,9	24,0	17,9
9	24,4	18,3	23,6	17,9
10	24,0	18,3	23,2	18,3
11	23,2	17,5	22,9	17,5
12	23,2	15,2	22,9	15,6
Médias	24,0	17,9	23,3	17,8

Tabela 4.11: Diferenças entre máximas e mínimas das temperaturas do ar na LC e na CV

Dia	ΔTbsMax (°C)	ΔTbsMin (°C)
5	0,8	0,4
6	0,8	0,4
7	1,2	0,0
8	0,8	0,0
9	0,8	0,4
10	0,8	0,0
11	0,4	0,0
12	0,4	-0,4
Médias	0,7	0,1

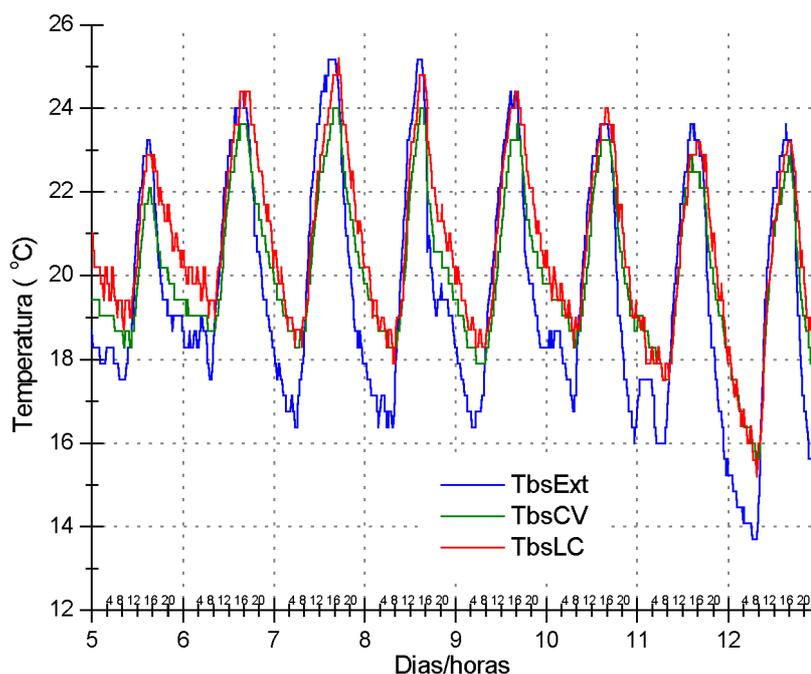


Figura 4.5: Comparação entre as curvas de temperaturas do ar na LC e na CV durante todo o período de medições – semana de 5 a 12 de junho de 2003

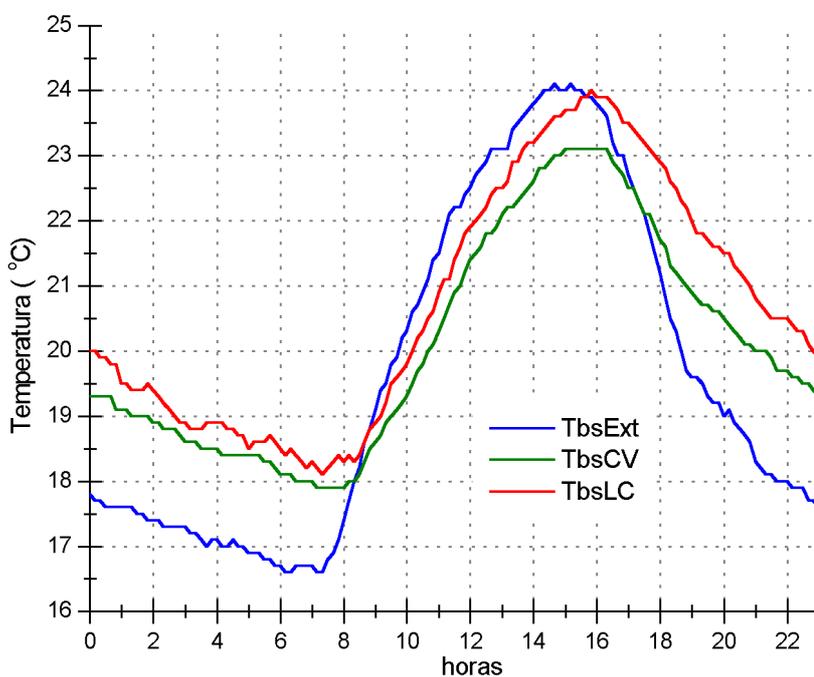


Figura 4.6: Comparação entre os valores médios da semana de 5 a 12 de junho das temperaturas do ar na LC e na CV

As diferenças entre as temperaturas do ar no interior do protótipo não foram significativas, uma vez que os ambientes, praticamente abertos para o exterior devido aos elementos vazados da parede posterior, sofrem grande influência do ar externo. A maior

diferença entre as temperaturas do ar nos ambientes com laje comum (Tbs LC) e com cobertura verde (Tbs CV) foi 1,2°C, no dia 7. Contudo, a temperatura do ar no ambiente com cobertura verde se manteve, durante todo o período, inferior à do ambiente com laje comum. Isto pode ser explicado devido ao aumento da capacidade térmica da cobertura verde durante o inverno, fazendo-a atuar como um modificador de microclimas internos às edificações.

4.1.4.2 Temperaturas superficiais internas

Os valores extremos das temperaturas superficiais das faces internas de ambas as coberturas e as diferenças entre eles são mostrados na Tabela 4.12 e na Tabela 4.13, respectivamente. A Figura 4.7 e a Figura 4.8 comparam as curvas de evolução dessas temperaturas de acordo com o período total de medições e quanto aos valores médios.

Tabela 4.12: Máximas e mínimas de temperaturas superficiais internas da LC e da CV

Dia	SupIntMax LC (°C)	SupIntMin LC (°C)	SupIntMax CV (°C)	SupIntMin CV (°C)
5	22,9	18,3	20,2	19,0
6	23,6	17,9	21,0	19,0
7	23,6	16,8	21,0	19,0
8	24,4	16,4	20,6	18,7
9	23,2	16,8	20,6	18,7
10	21,7	16,4	20,2	18,7
11	21,7	15,2	19,8	17,9
12	20,6	13,3	19,0	16,8
Médias	22,7	16,4	20,3	18,5

Tabela 4.13: Diferenças entre máximas e mínimas das superficiais internas da LC e da CV

Dia	Δ SupIntMax (°C)	Δ SupIntMin (°C)
5	2,7	-0,8
6	2,7	-1,1
7	2,7	-2,3
8	3,8	-2,3
9	2,7	-1,9
10	1,5	-2,3
11	1,9	-2,7
12	1,5	-3,4
Médias	2,4	-2,1

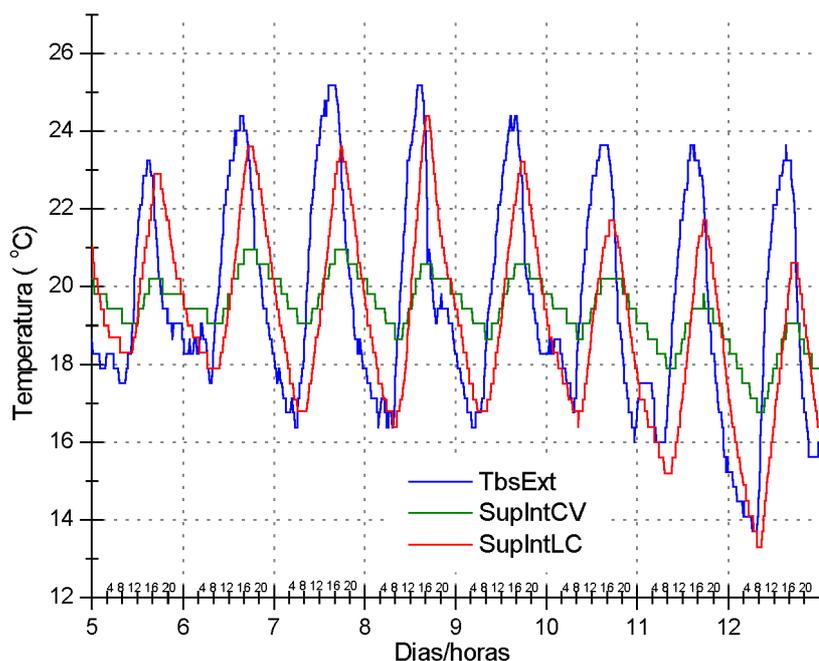


Figura 4.7: Comparação entre as curvas de temperaturas superficiais internas da LC e da CV durante a semana de 5 a 12 de junho de 2003

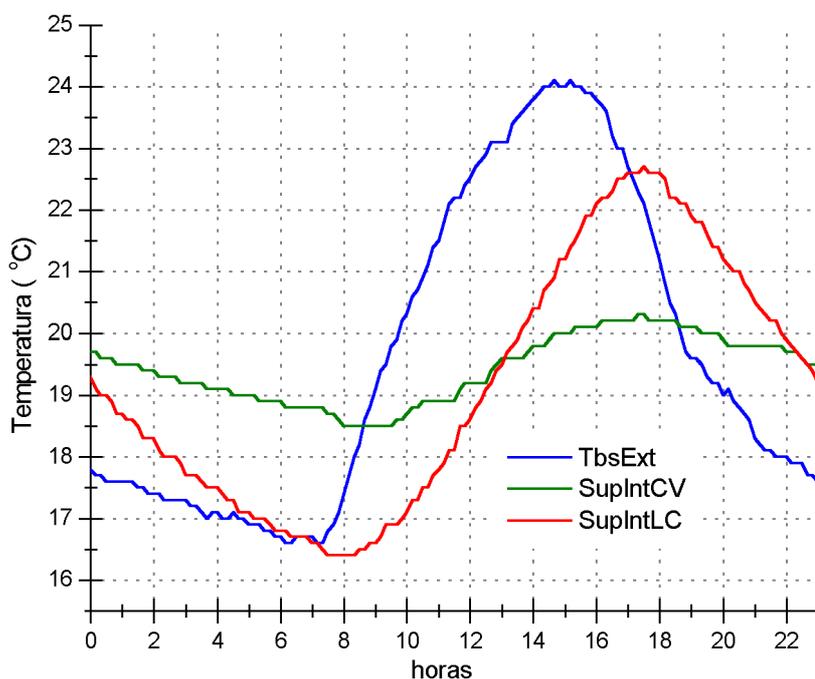


Figura 4.8: Comparação entre os valores médios da semana de 5 a 12 de junho das temperaturas superficiais internas da LC e da CV

Quanto às temperaturas superficiais internas, as quais apresentaram diferenças significativas, a da laje comum (SupIntLC) apresentou as maiores variações diárias, cuja máxima foi 24,4°C, registrada às 16:00h do dia 8, enquanto que a da cobertura verde (SupIntCV) foi 21°C, que ocorreu às 16:10h do dia 7. Os valores mínimos ocorreram, em

ambas as coberturas, no dia 12 às 7:30h, sendo na laje comum 13,3°C e na cobertura verde, 16,8°C. A maior estabilidade da temperatura superficial interna da cobertura verde, pode ser devido ao sombreamento provocado pela vegetação e à maior capacidade térmica causada, principalmente, pelas camadas de solo e de grama que compõem o sistema de cobertura verde do protótipo. As amplitudes térmicas médias, de 6,3°C e de 1,8°C, das temperaturas superficiais internas da laje comum e da cobertura verde, respectivamente, associadas aos coeficientes de amortecimento e atrasos térmicos das mesmas, evidenciaram o melhor desempenho da cobertura verde.

4.1.4.3 Temperaturas superficiais externas (estimativas)

A Figura 4.9 compara o comportamento estimado das curvas das temperaturas superficiais da face externa da laje comum (SupExtLC) e das folhas da camada de grama (SupExtCV) durante os dias medidos, enquanto a Figura 4.10 compara as curvas dos valores médios dessas temperaturas em um dia. Na Tabela 4.14 e na Tabela 4.15, respectivamente, são mostrados os valores máximos e mínimos dessas temperaturas e as diferenças entre eles.

Tabela 4.14: Máximas e mínimas das temperaturas superficiais externas na LC e na CV

Dia	SupExtMax LC (°C)	SupExtMin LC (°C)	SupExtMax CV (°C)	SupExtMin CV (°C)
5	44,3	17,8	31,4	16,5
6	46,7	17,6	29,6	14,9
7	47,2	16,3	30,5	13,2
8	47,3	16,3	32,5	13,7
9	45,5	16,3	28,0	14,0
10	45,9	16,3	26,5	12,3
11	45,5	15,5	26,3	11,1
12	45,7	13,8	30,3	9,9
Médias	46,0	16,2	29,4	13,2

Tabela 4.15: Diferenças entre máximas e mínimas das superficiais externas na LC e na CV

Dia	Δ SupExtMax (°C)	Δ SupExtMin (°C)
5	12,9	1,3
6	17,1	2,7
7	16,7	3,1
8	14,8	2,6
9	17,5	2,3
10	19,4	4,0
11	19,2	4,4
12	15,4	3,9
Médias	16,6	3,0

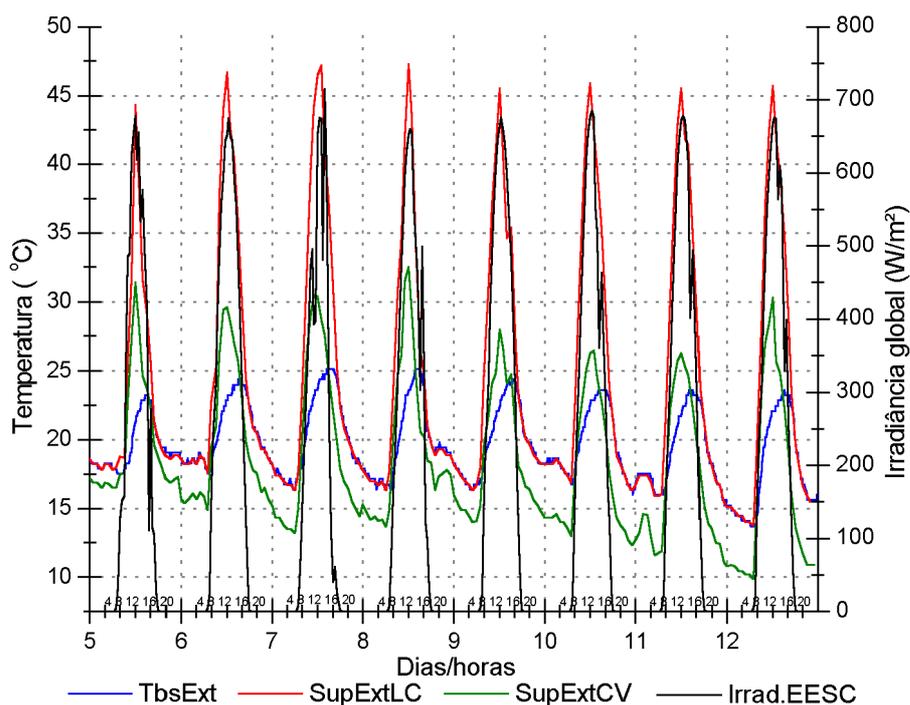


Figura 4.9: Comparação entre as curvas de temperaturas superficiais externas (estimadas) na LC e na superfície de folhas da CV e da irradiância solar global na EESC de 5 a 12 de junho

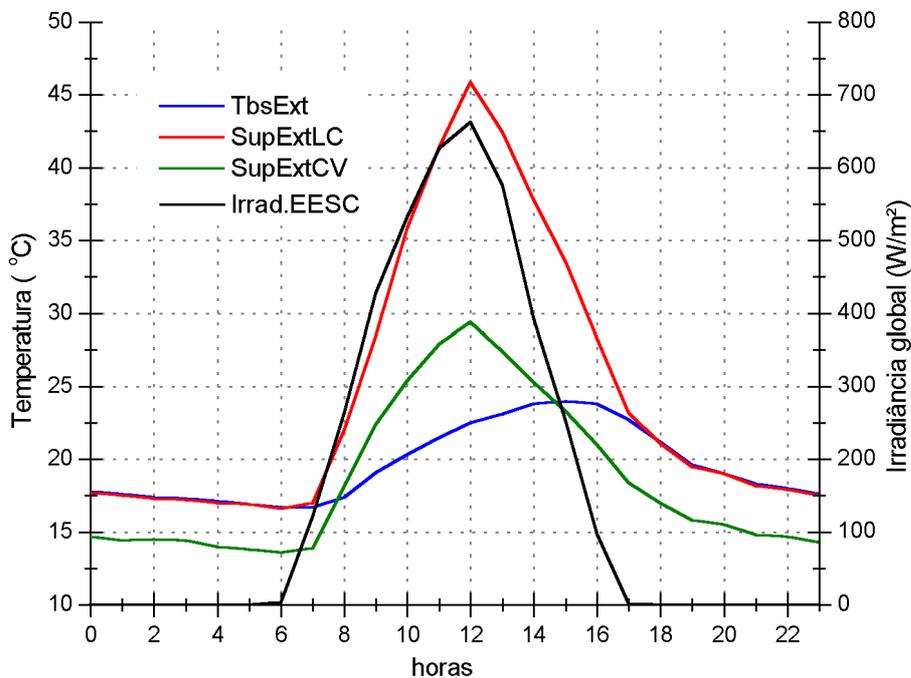


Figura 4.10: Comparação entre os valores médios da semana de 5 a 12 de junho das temperaturas superficiais externas (estimadas) da LC e na CV

De acordo com os gráficos da Figura 4.9 e da Figura 4.10, comparada com a temperatura superficial externa da laje comum (SupExtLC), a temperatura superficial da grama (SupExtCV) sofreu variações térmicas significativamente menores. A maior diferença entre elas foi de 19,4°C, no dia 10, quando a máxima atingida pela superfície de folhas foi 26,5°C, enquanto a máxima externa da laje comum atingiu 45,9°C, submetidas a uma irradiância solar de 665 W/m². Isto pode ser devido à capacidade da vegetação de reduzir o ganho de calor por irradiância solar de ondas longas, uma consequência do efeito de refrigeração evaporativa, visto que, aparentemente, tal irradiância influenciou, consideravelmente, ambas as temperaturas superficiais externas.

4.2 Desempenho térmico de verão

Os monitoramentos de verão ocorreram durante a semana de 15 a 22 de outubro de 2003. Os dados climáticos, para o mês de outubro de 2003, registrados pela estação climatológica da EESC (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, 2003b), quando comparados com os dados das Normais Climatológicas de 1961 a 1990 (BRASIL, Departamento Nacional de Meteorologia, 1992), apresentaram valores atípicos de mês úmido, com valores de temperatura média máxima do ar superior ao das Normais e de chuvas, inferior, conforme mostra a Tabela 4.16.

Tabela 4.16: Dados climatológicos do mês de outubro da EESC e das Normais

Variáveis	EESC out/03	Normais
Temperatura Média Máxima(°C)	34,2	24,7
Temperatura Média (°C)	22,6	19,7
Temperatura Média Mínima (°C)	11,3	14,7
Umidade Relativa (%)	61,9	60,0
Precipitação Pluviométrica (mm)	112,3	158,0
Número de dias chuvosos	11	-
Irradiância global (W/m ²)	154	151
Insolação (horas)	-	108,7

4.2.1 Dados climáticos

De 15 a 22 de outubro, as condições climáticas se mostraram constantes, com dias claros, temperaturas do ar elevadas e umidades relativas próprias para a época, cujos valores extremos absolutos registrados pela estação climatológica da EESC e pelas medições junto ao protótipo, podem ser conferidos na Tabela 4.17.

Tabela 4.17: Temperaturas e umidades relativas do ar de 15 a 22 de outubro

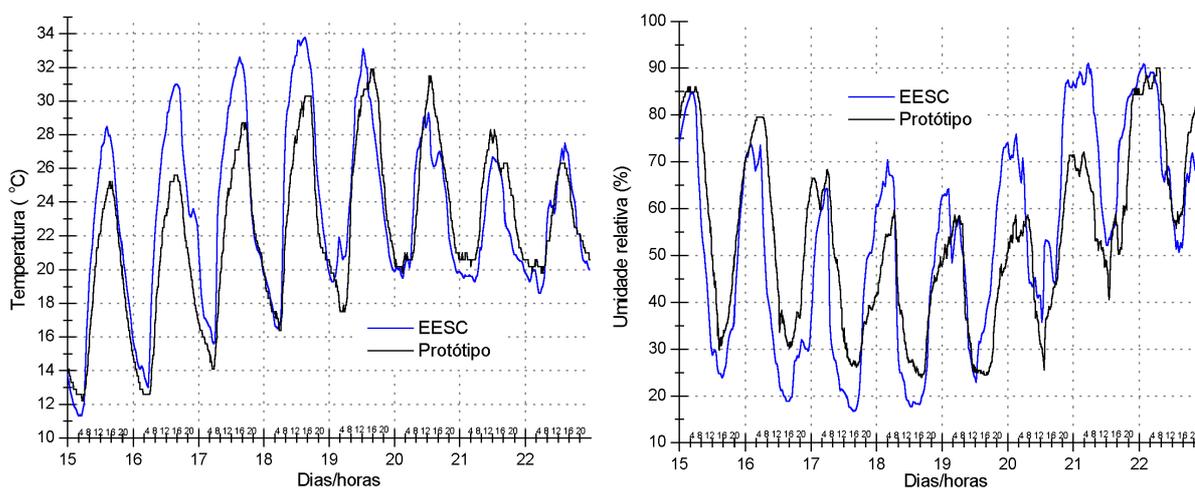
Fonte: Estação climatológica da EESC e dados in loco

	TbsMax (°C)	TbsMin (°C)	URMax (%)	URMin (%)
EESC	33,8	11,3	91,0	16,7
Protótipo	31,9	12,2	90,0	24,0

Os dados climáticos, registrados pela estação climatológica da EESC, que caracterizaram cada dia da semana de 15 a 22 de outubro são apresentados na Tabela 4.18.

Tabela 4.18: Dados climáticos da semana de 15 a 22 de outubro de 2003 na estação climatológica da EESC

Variáveis	Dia							
	15	16	17	18	19	20	21	22
Temperatura Máxima (°C)	27,8	28,5	31,0	32,6	33,8	33,1	29,3	26,7
Temperatura Média (°C)	19,1	19,9	22,9	24,3	25,7	25,0	23,9	22,1
Temperatura Mínima (°C)	11,7	11,3	13,0	15,6	16,5	19,3	19,5	19,3
Umidade Relativa (%)	57,6	52,3	40,7	37,7	40,7	48,7	60,3	76,1
Precipitação Pluviométrica (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Irradiância global (W/m ²)	303,5	308,3	303,2	292,7	268,0	235,2	108,9	196,0
Velocidade do vento (m/s)	1,5	1,1	0,7	0,6	0,6	1,0	0,7	1,3
Direção do vento (graus)	148,1	128,1	127,0	107,9	133,8	158,6	192,9	229,9

**Figura 4.11: Temperaturas e umidades relativas do ar na estação climatológica da EESC e no protótipo durante a semana de 15 a 22 de outubro de 2003**

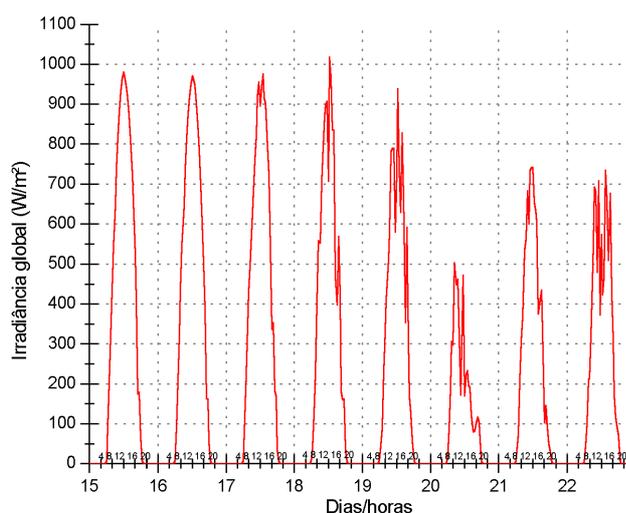


Figura 4.12: Irradiância solar global registrada na estação climatológica da EESC durante a semana de 15 a 22 de outubro de 2003

Os gráficos da Figura 4.11 mostram as curvas de evolução das temperaturas e umidades relativas do ar, na estação climatológica da EESC e no protótipo, durante a semana de 15 a 22 de outubro de 2003. A Figura 4.12 apresenta a irradiância solar global registrada na estação climatológica da EESC, no mesmo período.

4.2.2 Dados do protótipo: Laje Comum - LC

4.2.2.1 Temperaturas do ar e superficiais

O gráfico da Figura 4.13 ilustra as curvas de temperatura do ar (T_{bsExt} e T_{bsLC}) e temperatura superficial interna ($SupIntLC$), registradas no protótipo com laje comum – LC, e os de temperatura superficial externa ($SupExtLC$) (estimada). Os valores de máximas e mínimas dessas mesmas temperaturas estão resumidos na Tabela 4.19.

Tabela 4.19: Máximas e mínimas de temperaturas do ar e superficiais na laje comum - LC

Dia	T_{bsMax} Ext (°C)	T_{bsMin} Ext (°C)	T_{bsMax} LC (°C)	T_{bsMin} LC (°C)	$SupIntMax$ LC (°C)	$SupIntMin$ LC (°C)	$SupExtMax$ LC (°C)	$SupExtMin$ LC (°C)
15	25,2	12,2	29,1	14,1	48,0	12,2	56,4	12,5
16	25,6	12,6	29,5	14,9	48,5	12,9	57,3	12,5
17	28,7	14,1	32,8	16,8	51,2	14,9	57,3	12,5
18	30,3	16,4	34,4	19,4	51,8	17,9	59,1	14,0
19	31,9	17,5	34,9	20,2	49,0	19,4	66,0	17,4
20	31,5	19,8	32,3	22,1	47,4	21,0	62,9	19,7
21	28,3	20,2	28,7	22,5	34,0	21,0	44,4	20,5
22	26,3	19,8	27,5	21,0	36,1	19,0	51,6	19,7
Médias	28,5	16,6	31,2	18,9	45,8	17,3	56,9	16,1

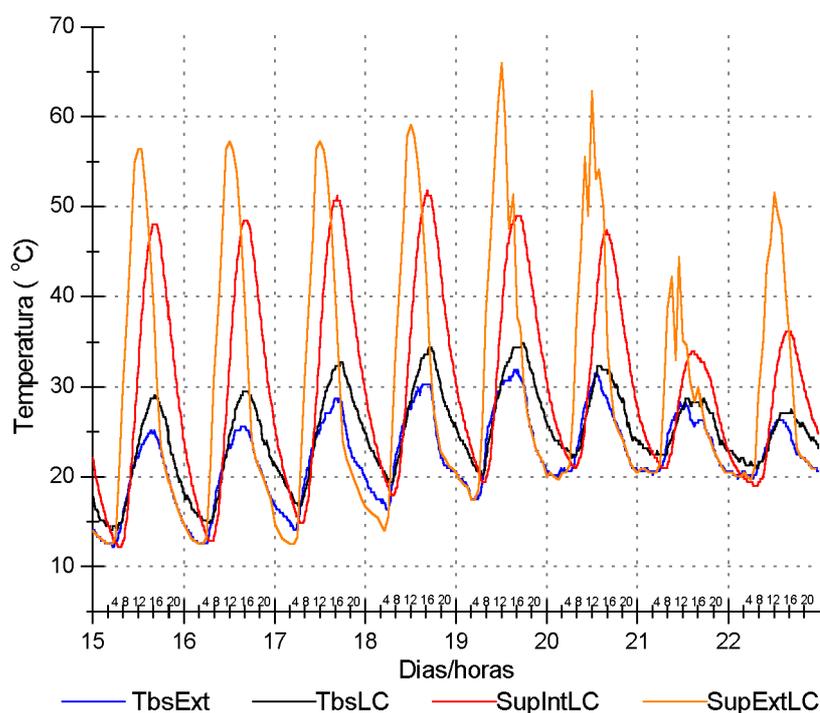


Figura 4.13: Temperaturas do ar e superficiais no protótipo com laje comum – LC

As diferenças (Δ) ($^{\circ}\text{C}$) das temperaturas máximas e mínimas do ar e superficiais do protótipo com laje comum, calculadas em relação às temperaturas do ar externo, preenchem a Tabela 4.20.

Tabela 4.20: Diferenças entre máximas e mínimas das temperaturas do ar e superficiais - LC

Dia	$\Delta\text{TbsMax LC}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{TbsMin LC}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{SupIntMax LC}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{SupIntMin LC}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{SupExtMax LC}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{SupExtMin LC}$ ($^{\circ}\text{C}$)
15	-3,9	1,9	-22,8	0,0	-31,6	-0,1
16	-3,9	2,3	-22,9	0,4	-31,7	-0,1
17	-4,1	2,7	-22,5	0,8	-28,6	-1,6
18	-4,1	3,0	-21,5	1,5	-28,8	-2,4
19	-2,9	2,7	-17,1	1,9	-34,5	-0,1
20	-0,8	2,3	-15,9	1,1	-31,8	-0,1
21	-0,4	2,3	-5,7	0,8	-16,5	-0,1
22	-1,2	1,1	-9,8	-0,8	-25,3	-0,1
Médias	-2,7	2,3	-17,3	0,7	-28,6	-0,6

A Tabela 4.21 mostra os atrasos térmicos, em horas (h), de máximas e mínimas das temperaturas internas e externas ao protótipo com laje comum, calculados em relação à temperatura do ar externo.

Tabela 4.21: Atrasos térmicos de máximas e de mínimas do protótipo com laje comum – LC

Dia	Atraso Térmico (φ) (h)					
	TbsMax LC	TbsMin LC	SupIntMax LC	SupIntMin LC	SupExtMax LC	SupExtMin LC
15	1,00	0,50	0,50	1,50	3,33	1,17
16	0,67	6,17	0,83	3,00	1,00	0,50
17	1,50	1,17	0,67	1,67	3,83	1,00
18	1,83	0,33	1,33	1,50	3,00	0,50
19	2,00	2,83	0,50	3,00	3,33	0,00
20	0,67	4,00	3,00	4,50	0,83	0,17
21	1,66	0,84	3,16	2,33	0,17	1,17
22	3,83	1,50	2,33	0,67	0,67	0,17
Médias	1,65	2,17	1,54	2,27	2,02	0,59

Apesar da influência do ar externo sobre o ar interno da edificação, de acordo com os dados da Figura 4.13 e da Tabela 4.19 à Tabela 4.21, percebe-se que tanto a temperatura do ar interno (TbsLC) quanto as superficiais interna (SupIntLC) e externa (SupExtLC) variaram significativamente em relação à temperatura do ar externo (TbsExt), a qual atingiu valores extremos de 31,9°C às 15:20h do dia 19 e, 12,2°C às 5:10h do dia 15, respectivamente, com amplitude térmica média de 11,9°C.

Quanto à temperatura do ar interno ao protótipo com laje comum (TbsLC), esta alcançou seu valor máximo de 34,9°C dia 19 às 17:20h e mínimo, de 14,1°C às 4:40h do dia 15, com amplitude térmica média de 12,3°C. Com relação ao ar externo, as diferenças de temperatura variaram de 0,4 a 4,1°C, o atraso térmico de máximas foi de 2 horas, enquanto a mínima temperatura do ar interno à laje comum (TbsMinLC) ocorreu com uma defasagem de 0,50 horas.

Quanto aos valores máximo e mínimo da temperatura superficial interna (SupIntLC), os mesmos atingiram 51,8°C, dia 18 às 16:20h e 12,2°C dia 15 às 6:40h, respectivamente, com uma amplitude térmica média foi de 28,5°C. Comparada com a hora de ocorrência da máxima temperatura do ar externo, a máxima temperatura superficial interna da laje comum (SupIntMaxLC) ocorreu com uma defasagem de 23 horas, o atraso térmico de mínimas foi de 1,5 horas. O coeficiente médio de amortecimento térmico (μ) da laje comum, calculado por meio das temperaturas do ar externo e superficiais internas, foi de 22,95. As diferenças de temperatura, relativas ao ar externo, variaram de 0 a 23°C.

De acordo com gráfico da Figura 4.13 e os dados da Tabela 4.19 à Tabela 4.21, os valores extremos, estimados, da temperatura superficial externa da laje comum (SupExtLC) variaram de 12,5 a 66,0°C, com amplitude térmica média de 40,8°C. Em relação à temperatura do ar externo, as diferenças de temperatura variaram de 0,1 a 34,5°C.

4.2.3 Dados do protótipo: Cobertura Verde – CV

4.2.3.1 Temperaturas do ar e superficiais

A Figura 4.14 mostra as curvas de temperaturas do ar (TbsExt e TbsCV) e temperaturas superficiais internas (SupIntCV), registradas no protótipo com cobertura verde – CV, e de temperaturas da superfície da grama (SupExtCV) (estimadas). A Tabela 4.22 resume os valores de máximas e mínimas dessas mesmas temperaturas.

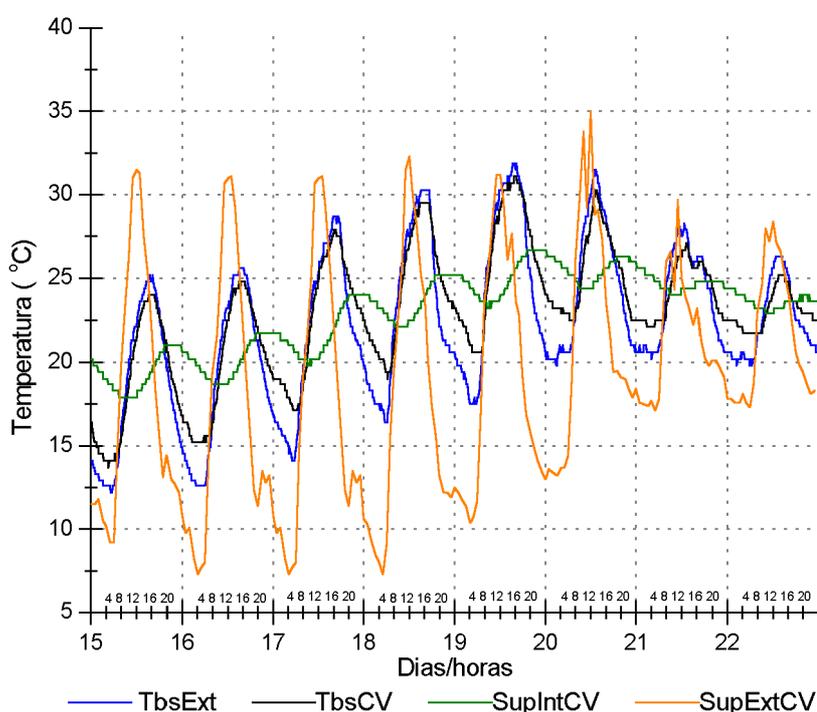


Figura 4.14: Temperaturas internas e externas no protótipo com cobertura verde - CV

Tabela 4.22: Máximas e mínimas de temperaturas do ar e superficiais na cobertura verde - CV

Dia	TbsExtMax (°C)	TbsExtMin (°C)	TbsMax CV (°C)	TbsMin CV (°C)	SupIntMax CV (°C)	SupIntMin CV (°C)	SupExtMax CV (°C)	SupExtMin CV (°C)
15	25,2	12,2	24,0	13,7	21,0	17,9	31,5	9,2
16	25,6	12,6	24,8	15,2	21,7	18,7	31,1	7,3
17	28,7	14,1	27,9	17,1	24,0	19,8	31,1	7,3
18	30,3	16,4	29,5	19,0	25,2	22,1	32,3	7,3
19	31,9	17,5	31,1	20,6	26,7	23,2	31,2	10,4
20	31,5	19,8	30,3	22,5	26,7	24,4	35,0	13,0
21	28,3	20,2	27,1	22,1	26,0	24,0	29,7	17,1
22	26,3	19,8	25,2	21,7	24,4	22,9	28,4	17,3
Médias	28,5	16,6	27,5	19,0	24,5	21,6	31,3	11,1

A Tabela 4.23 apresenta as diferenças (Δ) ($^{\circ}\text{C}$) das temperaturas máximas e mínimas do ar e superficiais do protótipo de cobertura verde, calculadas em relação às temperaturas do ar externo.

Tabela 4.23: Diferenças entre máximas e mínimas das temperaturas do ar e superficiais - CV

Dia	$\Delta\text{TbsMax CV}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{TbsMin CV}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{SupIntMax CV}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{SupIntMin CV}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{SupExtMax CV}$ ($^{\circ}\text{C}$)	$\Delta\text{SupExtMin CV}$ ($^{\circ}\text{C}$)
15	1,2	1,5	4,2	5,7	6,7	-3,4
16	0,8	2,7	3,9	6,1	5,5	-5,3
17	0,8	3,1	4,7	5,7	2,4	-6,8
18	0,8	2,7	5,1	5,7	2,0	-9,1
19	0,8	3,1	5,2	5,7	-0,3	-7,1
20	1,2	2,7	4,8	4,6	3,9	-6,8
21	1,2	1,9	2,4	3,8	1,8	-3,5
22	1,2	1,9	1,9	3,1	2,1	-2,5
Médias	1,0	2,4	4,0	5,1	3,0	-5,5

Os atrasos térmicos (φ), em horas (h), de máximas e mínimas das temperaturas internas e externas ao protótipo com cobertura verde, em relação à temperatura do ar externo, são mostrados na Tabela 4.24.

Tabela 4.24: Atrasos térmicos de máximas e de mínimas do protótipo cobertura verde – CV

Dia	Atraso Térmico (φ)					
	TbsMax CV	TbsMin CV	SupIntMax CV	SupIntMin CV	SupExtMax CV	SupExtMin CV
15	0,00	0,50	4,00	2,16	3,33	0,17
16	0,00	0,83	4,33	4,33	2,00	0,50
17	0,17	0,17	4,00	4,17	2,83	1,00
18	0,17	0,83	3,83	2,67	3,00	0,50
19	0,34	0,67	3,84	4,67	4,33	0,00
20	0,50	3,50	12,83	6,00	0,83	2,83
21	2,00	1,34	11,17	4,66	0,17	0,83
22	0,66	1,83	12,67	4,17	0,67	0,17
Médias	0,48	1,21	7,08	4,10	2,15	0,75

De acordo com os dados da Tabela 4.22 à Tabela 4.24 e da Figura 4.14, em relação à temperatura do ar externo, as temperaturas do ar no interior do protótipo com cobertura verde (TbsCV) se mantiveram menores durante o dia, cujas diferenças variaram de 0,8 a 3,1 $^{\circ}\text{C}$. Os valores máximo e mínimo foram de 31,1 $^{\circ}\text{C}$ às 15:20h do dia 19 e 13,7 $^{\circ}\text{C}$ às 4:40h do dia 15, respectivamente, com uma amplitude térmica média de 8,5 $^{\circ}\text{C}$. A máxima temperatura do ar no interior do protótipo com cobertura verde (TbsMaxCV) ocorreu simultaneamente à máxima do ar externo, com isso não houve atraso térmico de máximas, enquanto a mínima (TbsMinCV) ocorreu com uma defasagem de 0,50 horas.

A temperatura superficial interna da cobertura verde (SupIntCV) atingiu valores máximo e mínimo de 26,7°C, dia 19 às 19:20h, e 17,9°C dia 15 às 7:20h, respectivamente, com uma amplitude térmica média de 2,9°C. Em relação à temperatura do ar externo, o atraso térmico de máximas foi de 8,33 horas, enquanto o de mínimas foi de 2,16 horas. As diferenças entre essas temperaturas variaram de 1,9 a 6,1°C. O coeficiente médio de amortecimento térmico (μ) da cobertura verde, calculado por meio das temperaturas do ar externo e superficiais internas, foi de 1,90.

Os valores extremos estimados da temperatura da superfície de folhas (SupExt CV) variaram de 7,3 a 35,0°C, com amplitude térmica média de 20,2°C. Com relação à temperatura do ar externo, as diferenças de temperatura variaram de 0,3 a 9,1°C.

4.2.4 Comparação entre laje comum e cobertura verde: LC x CV

As comparações foram feitas com base no período total de medições (semana de 15 a 22 de outubro) e no dia de referência, o qual foi calculado considerando-se, para cada dia da semana, a média de cada hora.

4.2.4.1 Temperaturas do ar

A Figura 4.15 compara o comportamento das curvas de temperaturas do ar interno e externo aos ambientes de cada cobertura durante a semana de 15 a 22 de outubro de 2003, enquanto a Figura 4.16 mostra as curvas dos valores médios dessas temperaturas em um período de 24 horas. Na Tabela 4.25 e na Tabela 4.26, respectivamente, são mostrados os valores máximos e mínimos das temperaturas do ar interno aos ambientes e as diferenças entre eles.

Tabela 4.25: Máximas e mínimas das temperaturas do ar na LC e na CV

Dia	TbsMax LC (°C)	TbsMin LC (°C)	TbsMax CV (°C)	TbsMax CV (°C)
15	29,1	14,1	24,0	13,7
16	29,5	14,9	24,8	15,2
17	32,8	16,8	27,9	17,1
18	34,4	19,4	29,5	19,0
19	34,9	20,2	31,1	20,6
20	32,3	22,1	30,3	22,5
21	28,7	22,5	27,1	22,1
22	27,5	21,0	25,2	21,7
Médias	31,2	18,9	27,5	19,0

Tabela 4.26: Diferenças entre máximas e mínimas das temperaturas do ar na LC e na CV

Dia	ΔT_{bsMax} (°C)	ΔT_{bsMin} (°C)
15	5,1	0,4
16	4,7	-0,4
17	4,9	-0,4
18	4,9	0,4
19	3,7	-0,4
20	2,0	-0,4
21	1,6	0,4
22	2,4	-0,8
Médias	3,7	0,5

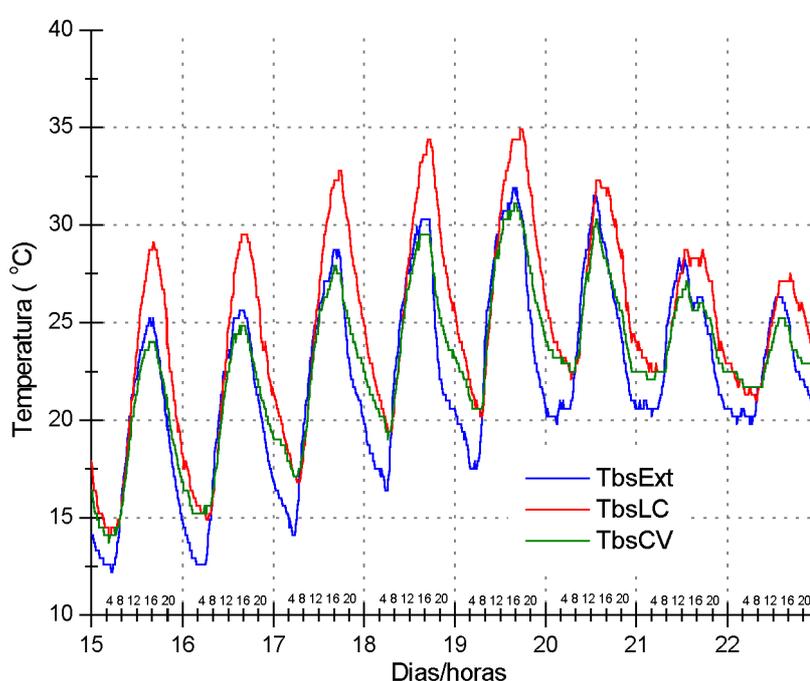


Figura 4.15: Comparação entre as curvas de temperaturas do ar na LC e na CV durante a semana de 15 a 22 de outubro de 2003

A comparação das temperaturas do ar interno aos ambientes com cobertura verde (TbsCV) e com laje comum (TbsLC) revelou expressivas diferenças entre as mesmas. Nos horários mais quentes do dia, durante todo o período de medições, das 10:00h às 18:00h, a temperatura máxima do ar no ambiente com cobertura verde permaneceu abaixo tanto da temperatura do ar externo (TbsExt), quanto da temperatura do ar no interior do ambiente com laje comum (TbsLC). A maior diferença entre as temperaturas do ar interno em ambas coberturas, de 5,1°C, aconteceu às 16:00h do dia 15, quando a temperatura do ar interno ao ambiente com cobertura verde atingiu 24,0°C e a do ambiente com laje comum chegou a 29,1°C. Neste sentido, o melhor desempenho da cobertura verde pode estar associado às funções biológicas da vegetação como fotossíntese e evaporação, que absorvem parcelas

significativas de irradiância solar, reduzindo, assim, as temperaturas superficiais internas da laje, as quais amenizam as temperaturas do ar no interior da edificação durante o verão.

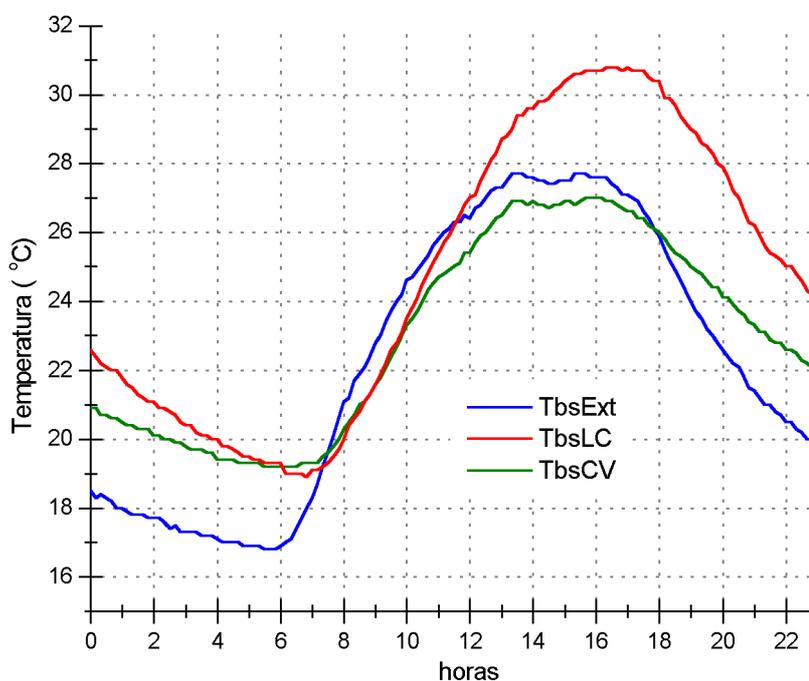


Figura 4.16: Comparação entre os valores médios da semana de 15 a 22 de outubro das temperaturas do ar na LC e na CV

4.2.4.2 Temperaturas superficiais internas

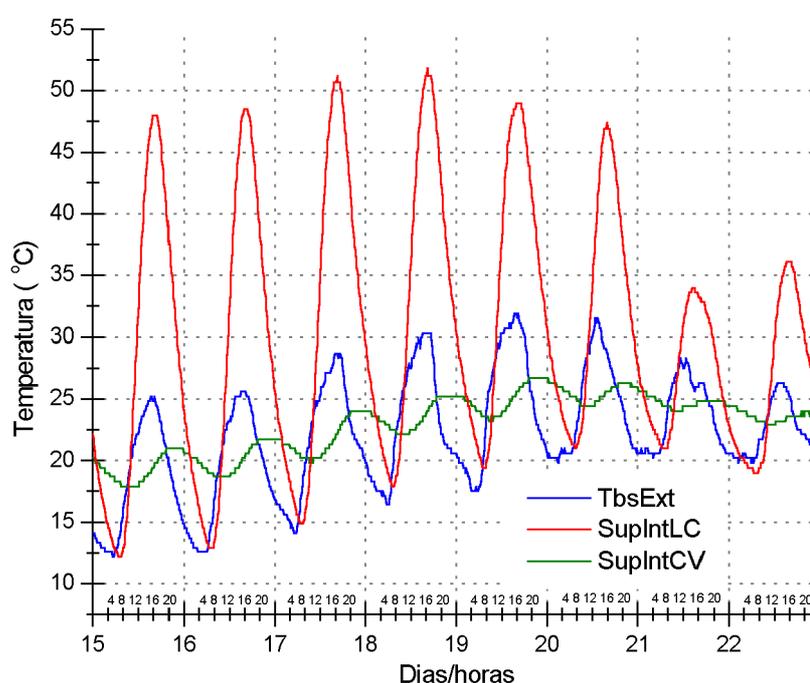
A Tabela 4.27 e a Tabela 4.28 resumem, respectivamente, os valores extremos das temperaturas superficiais das faces internas de ambas as coberturas e as diferenças entre eles. A comparação das curvas de evolução dessas temperaturas, durante todos os dias de medições, estão na Figura 4.17. Na Figura 4.18 são comparadas as curvas dessas temperaturas em relação aos valores médios horários de cada dia.

Tabela 4.27: Máximas e mínimas de temperaturas superficiais internas da LC e da CV

Dia	SupIntMax LC (°C)	SupIntMin LC (°C)	SupIntMax CV (°C)	SupIntMin CV (°C)
15	48,0	12,2	21,0	17,9
16	48,5	12,9	21,7	18,7
17	51,2	14,9	24,0	19,8
18	51,8	17,9	25,2	22,1
19	49,0	19,4	26,7	23,2
20	47,4	21,0	26,7	24,4
21	34,0	21,0	26,0	24,0
22	36,1	19,0	24,4	22,9
Médias	45,8	17,3	24,5	21,6

Tabela 4.28: Diferenças entre máximas e mínimas das superficiais internas da LC e da CV

Dia	$\Delta\text{SupIntMax}$ (°C)	$\Delta\text{SupIntMin}$ (°C)
15	27,0	-5,7
16	26,8	-5,7
17	27,2	-5,0
18	26,6	-4,2
19	22,3	-3,8
20	20,7	-3,5
21	8,1	-3,1
22	11,7	-3,8
Médias	21,3	-4,3

**Figura 4.17: Comparação entre as curvas de temperaturas superficiais internas da LC e da CV durante a semana de 15 a 22 de outubro de 2003**

De acordo com a Figura 4.18, pode-se notar a maior estabilidade da temperatura superficial interna da cobertura verde (SupIntCV). Esta se manteve acima da temperatura do ar externo (TbsExt) durante o período noturno (das 19:00 até às 8:00h da manhã seguinte) e da superficial interna da laje comum (SupIntLC) das 2:00h às 9:00h, devido à maior amplitude provocada por esta última. Em contrapartida, nos horários mais quentes do dia, a cobertura verde contribui para a refrigeração do ambiente, pois sua temperatura superficial permaneceu abaixo das temperaturas do ar externo e da superficial interna da laje comum das 10:00h até às 19:00h. A maior diferença entre as temperaturas superficiais internas das lajes, 27,2°C, ocorreu dia 17 às 16:30h, quando a máxima superficial interna da cobertura verde atingiu 24,0°C e a mesma temperatura da laje comum alcançou 51,2°C. Diante do

exposto, o desempenho superior da cobertura verde, possivelmente, se deve à combinação das camadas de solo e vegetação, as quais proporcionam efeitos de sombreamento e refrigeração evaporativa, que protegem termicamente a cobertura das variações térmicas.

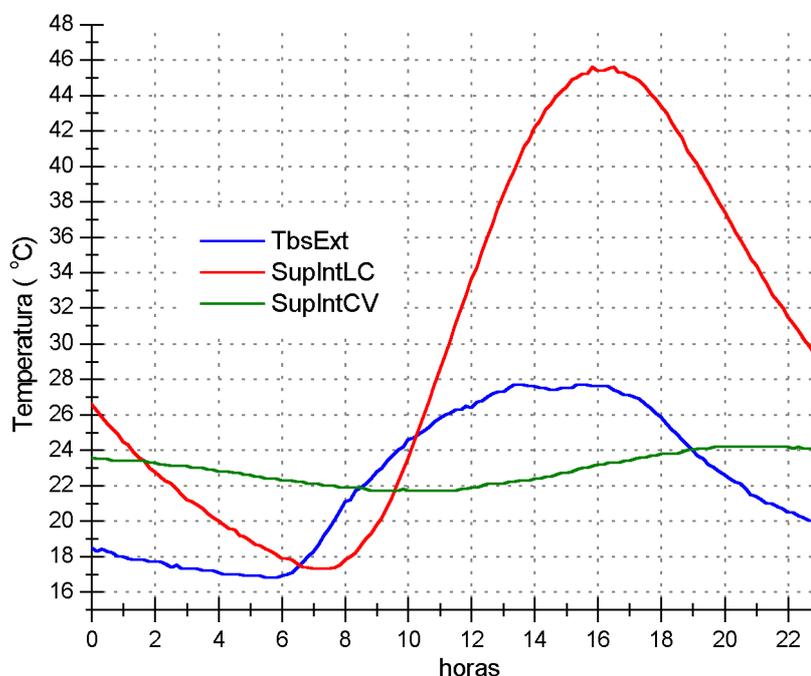


Figura 4.18: Comparação entre os valores médios da semana de 15 a 22 de outubro das temperaturas superficiais internas da LC e da CV

4.2.4.3 Temperaturas superficiais externas (estimativas)

Tabela 4.29: Máximas e mínimas das temperaturas superficiais externas na LC e na CV

Dia	SupExtMax LC (°C)	SupExtMin LC (°C)	SupExtMax CV (°C)	SupExtMin CV (°C)
15	56,4	12,5	31,5	9,2
16	57,3	12,5	31,1	7,3
17	57,3	12,5	31,1	7,3
18	59,1	14,0	32,3	7,3
19	66,0	17,4	31,2	10,4
20	62,9	19,7	35,0	13,0
21	44,4	20,5	29,7	17,1
22	51,6	19,7	28,4	17,3
Médias	56,9	16,1	31,3	11,1

A Figura 4.19 compara o comportamento estimado das curvas das temperaturas superficiais da face externa da laje comum (SupExtLC) e da grama (SupExtCV) durante a semana de medições. A Figura 4.20 compara o comportamento dessas temperaturas em relação ao valores médios do período total de medições. Na Tabela 4.29 e na Tabela 4.30, respectivamente, são mostrados os valores máximos e mínimos dessas temperaturas e as diferenças entre eles.

Tabela 4.30: Diferenças entre máximas e mínimas das superficiais externas na LC e na CV

Dia	$\Delta\text{SupExtMax}$ (°C)	$\Delta\text{SupExtMin}$ (°C)
15	24,9	3,3
16	26,2	5,2
17	26,2	5,2
18	26,8	6,7
19	34,8	7,0
20	27,9	6,7
21	14,7	3,4
22	23,2	2,4
Médias	25,6	5,0

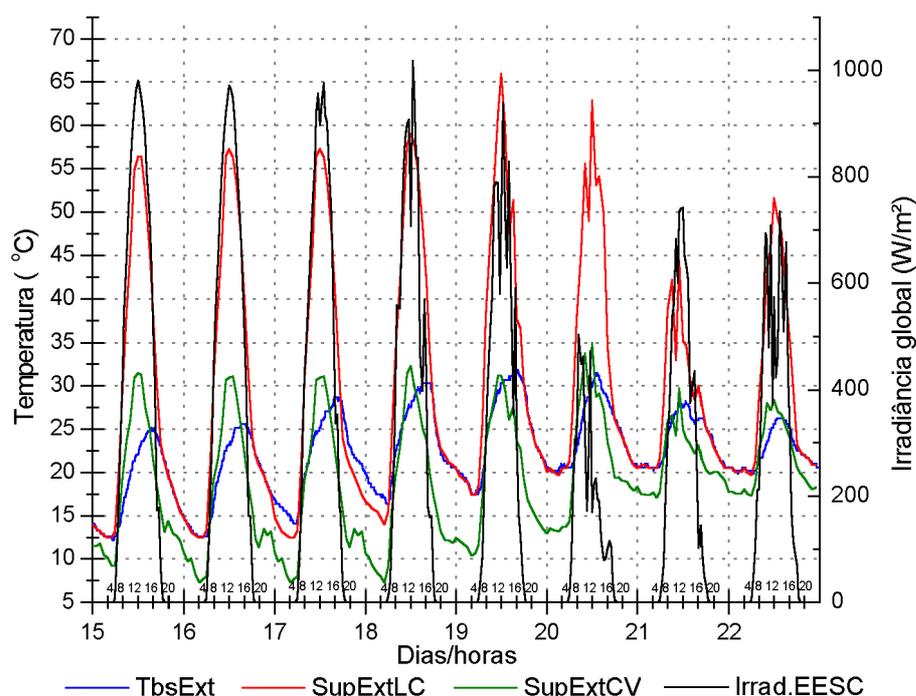


Figura 4.19: Comparação entre as curvas de temperaturas superficiais externas (estimadas) na LC e na superfície de folhas da CV e da irradiância solar global na EESC de 15 a 22 de outubro

Observando os gráficos da Figura 4.10, nota-se que as curvas representativas entre as estimativas das temperaturas superficiais externas, da laje comum e das folhas da cobertura verde, demonstram, quantitativamente, as significantes diferenças entre elas, que chegaram a 34,8°C, dia 19 às 12:00h, quando a máxima temperatura da superfície da grama (SupExtCV) atingiu 31,2°C e a mesma temperatura na superfície externa da laje comum (SupExtLC) chegou a 66°C, submetidas a uma irradiância solar máxima de 908 W/m². Estas diferenças podem estar associadas à capacidade da vegetação de irradiar e refletir menos calor solar, que reduz a quantidade calor reirradiado para o ambiente em torno do edifício, amenizando fenômenos térmicos urbanos como o de ilha de calor.

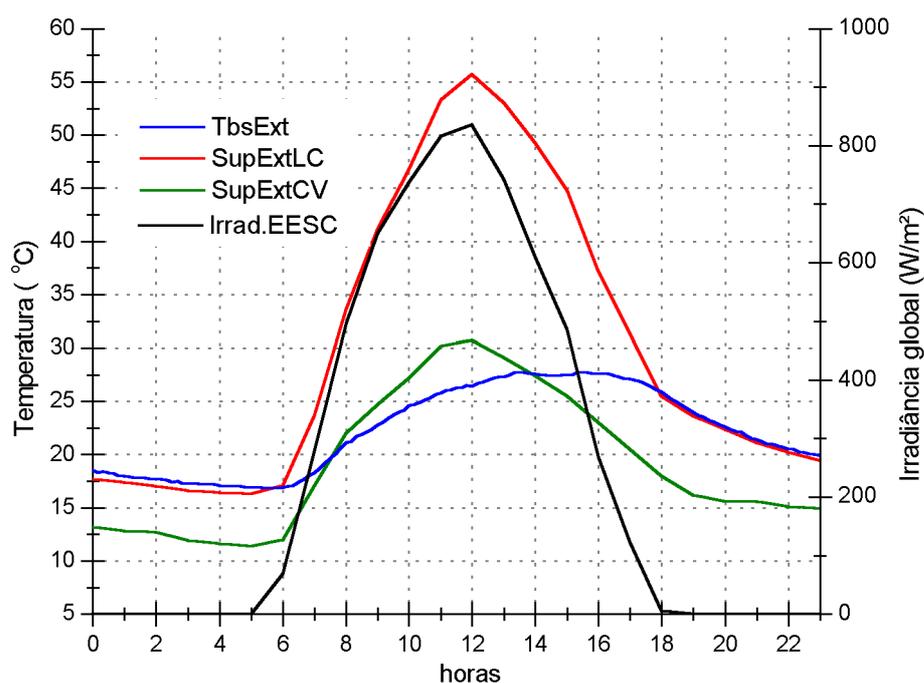


Figura 4.20: Comparação entre os valores médios das temperaturas superficiais externas (estimadas) na LC e na superfície de folhas da CV e da irradiância solar global na EESC

4.3 Comparação dos desempenhos térmicos das coberturas no inverno e no verão: LC x CV (inverno) X (verão) LC x CV

Esta comparação se dá por meio da análise dos comportamentos das coberturas nas semanas de 5 a 12 de junho (situação de inverno) e de 15 a 22 de outubro (situação de verão) e pelos valores médios dos dois períodos de medições. Foram confrontadas as temperaturas do ar, temperaturas superficiais internas e externas (estimadas) referentes à ambas as coberturas, com o intuito de expor as diferenças entre as mesmas para cada uma das situações analisadas.

4.3.1 Temperaturas do ar

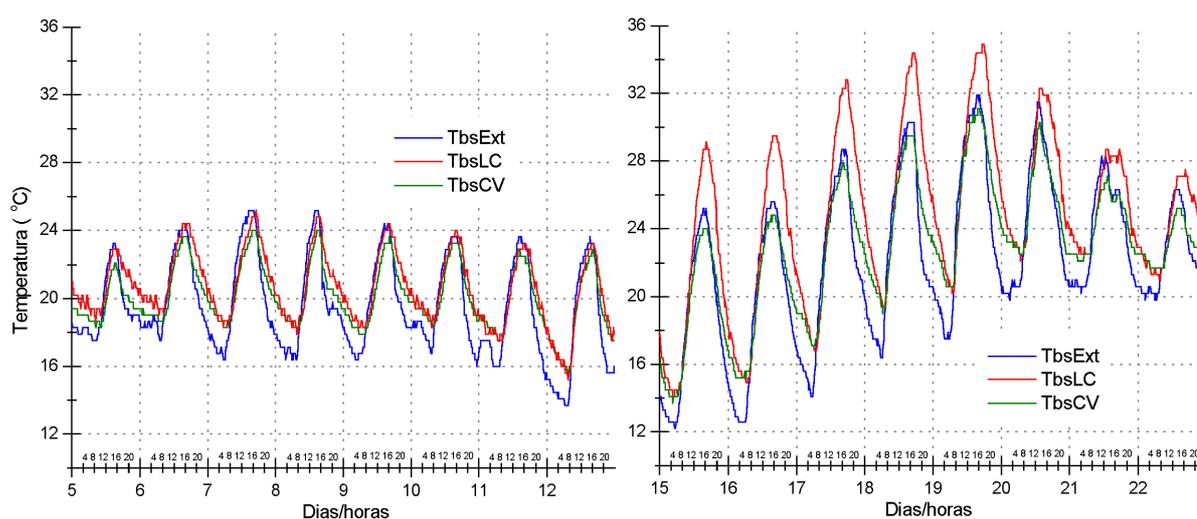
A Tabela 4.31 e a Tabela 4.32 resumem os valores máximos e mínimos das temperaturas do ar em ambas as coberturas e suas amplitudes térmicas médias no períodos de inverno e de verão, respectivamente. A Figura 4.21 e a Figura 4.22 comparam as curvas de evolução dessas temperaturas em ambos os períodos citados.

Tabela 4.31: Máximas e mínimas das temperaturas do ar em ambas as coberturas nos períodos de inverno e de verão

	Variáveis					
	TbsExtMax (°C)	TbsExtMin (°C)	TbsMax LC (°C)	TbsMin LC (°C)	TbsMax CV (°C)	TbsMin CV (°C)
Inverno	25,2	13,7	25,2	15,2	24,0	15,6
Verão	31,9	12,2	34,9	14,1	31,1	13,7

Tabela 4.32: Amplitudes térmicas médias das temperaturas do ar em ambas as coberturas nos períodos de inverno e de verão

	Amplitudes térmicas médias (Δ)		
	Δ TbsExt (°C)	Δ Tbs LC (°C)	Δ Tbs CV (°C)
Inverno	8,0	6,1	5,5
Verão	11,9	12,3	8,5

**Figura 4.21: Comparação entre temperaturas do ar em ambas as coberturas em situação de inverno (5 a 12 de junho (esquerda)) e de verão (15 a 22 de outubro (direita))**

Comparando as curvas das temperaturas do ar interno e externo ao protótipo, percebe-se que, tanto no verão quanto no inverno, a temperatura do ar no interior do ambiente com cobertura verde (TbsCV) se manteve mais estável do que a temperatura do ar no ambiente com laje comum (TbsLC). Contudo, as maiores amplitudes térmicas e diferenças entre essas temperaturas ocorreram no verão. No inverno, as maiores diferenças entre as máximas temperaturas do ar no interior dos ambientes das coberturas foram de 1,2°C e, no verão, 3,8°C. Isto pode ter ocorrido devido à função térmica isolante exercida pela cobertura verde, provocada pela camada de ar, quase em repouso, que se forma entre as folhas da camada de vegetação.

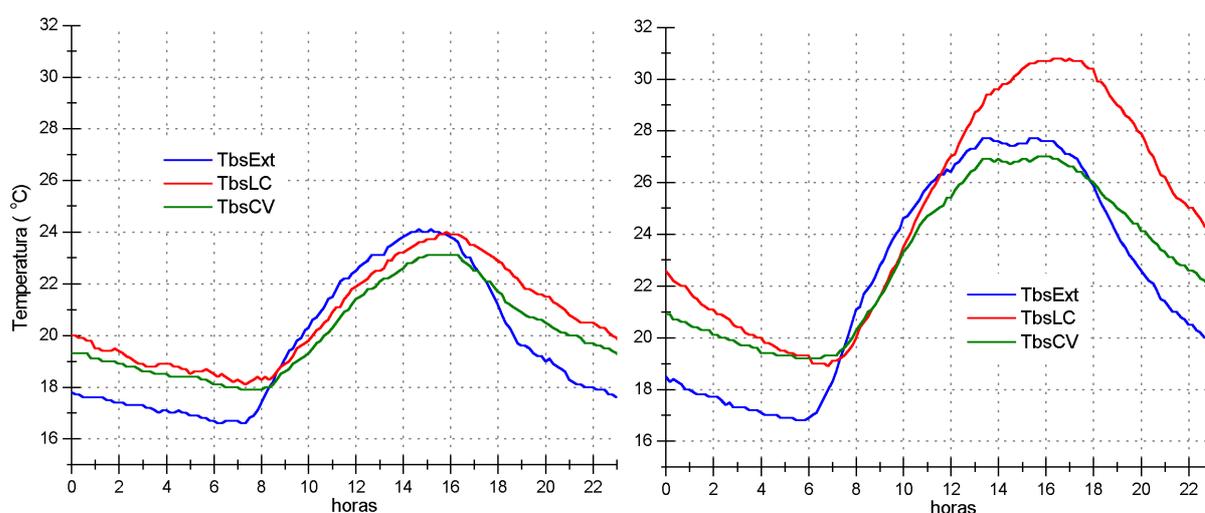


Figura 4.22: Comparação entre os valores médios das temperaturas do ar em ambas as coberturas em situação de inverno (esquerda) e verão (direita)

4.3.2 Temperaturas superficiais internas

A evolução das temperaturas superficiais internas de ambas as coberturas, ao longo dos períodos analisados e os valores médios de cada um desses períodos, está representada na Figura 4.23. A Tabela 4.33 e a Tabela 4.34 resumem os valores máximos e mínimos dessas temperaturas em ambas as coberturas e suas amplitudes térmicas médias no períodos de inverno e de verão, respectivamente

Tabela 4.33: Máximas e mínimas das temperaturas superficiais internas de ambas as coberturas nos períodos de inverno e de verão

	Variáveis					
	TbsExtMax (°C)	TbsExtMin (°C)	SupIntMax LC (°C)	SupIntMin LC (°C)	SupIntMax CV (°C)	SupIntMin CV (°C)
Inverno	25,2	13,7	24,4	13,3	21,0	16,8
Verão	31,9	12,2	51,8	12,2	26,7	17,9

Tabela 4.34: Amplitudes térmicas médias das temperaturas superficiais internas de ambas as coberturas nos períodos de inverno e de verão

	Amplitudes térmicas médias (Δ)		
	Δ TbsExt (°C)	Δ SupInt LC (°C)	Δ SupInt CV (°C)
Inverno	8,0	6,3	1,8
Verão	11,9	28,5	2,8

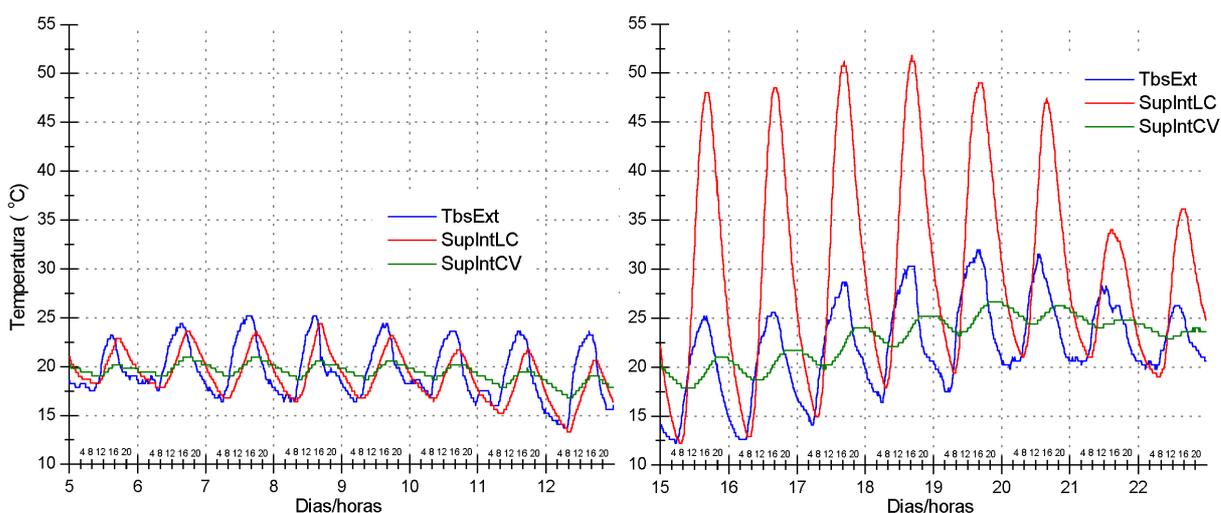


Figura 4.23: Comparação entre temperaturas superficiais internas de ambas as coberturas em situação de inverno (5 a 12 de junho (esquerda)) e de verão (15 a 22 de outubro (direita))

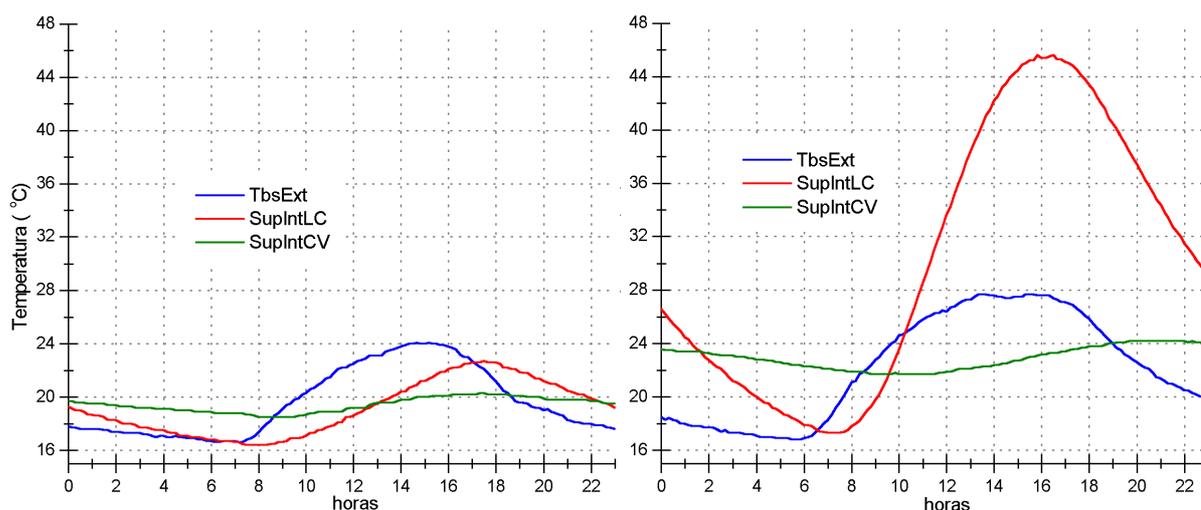


Figura 4.24: Comparação entre os valores médios das temperaturas superficiais internas de ambas as coberturas em situação de inverno (esquerda) e verão (direita)

Os gráficos da Figura 4.23 e da Figura 4.24 evidenciam que em relação à temperatura superficial interna da laje comum (SupIntLC), tanto no inverno quanto no verão, a temperatura superficial interna da cobertura verde (SupIntCV) se manteve mais resistente às variações térmicas diárias. As maiores diferenças das máximas temperaturas superficiais internas das coberturas foram de 3,4°C no inverno e, 25,1°C, no verão, quando foram constatadas as maiores amplitudes térmicas de ambas as temperaturas. Todavia, nesse período, a amplitude térmica média da temperatura superficial interna da laje comum (Δ SupIntLC) superou a da cobertura verde (Δ SupIntCV) em 25,7°C. Tais diferenças podem ser devido à maior capacidade da cobertura verde de amortecer as flutuações térmicas

diárias, uma consequência da ação conjunta de sua maior espessura com a umidade retida na camada de solo.

4.3.3 Temperaturas superficiais externas (estimativas)

A Tabela 4.35 e a Tabela 4.36 resumem, respectivamente, os valores máximos e mínimos das temperaturas superficiais externas da laje comum e na grama da cobertura verde e suas amplitudes térmicas médias nos períodos de inverno e de verão. A Figura 4.25 e Figura 4.26 comparam as curvas de evolução dessas temperaturas em ambos os períodos citados.

Tabela 4.35: Máximas e mínimas das temperaturas superficiais externas da laje comum e da grama nos períodos de inverno e de verão

	Variáveis					
	TbsExtMax (°C)	TbsExtMin (°C)	SupExtMax LC (°C)	SupExtMin LC (°C)	SupExtMax CV (°C)	SupExtMin CV (°C)
Inverno	25,2	13,7	47,3	13,8	32,5	9,9
Verão	31,9	12,2	66,0	12,5	35,0	7,3

Tabela 4.36: Amplitudes térmicas médias das temperaturas superficiais externas da laje comum e da grama nos períodos de inverno e de verão

	Amplitudes térmicas médias (Δ)		
	Δ TbsExt (°C)	Δ SupExt LC (°C)	Δ SupExt CV (°C)
Inverno	8,0	29,8	16,2
Verão	11,9	40,8	20,2

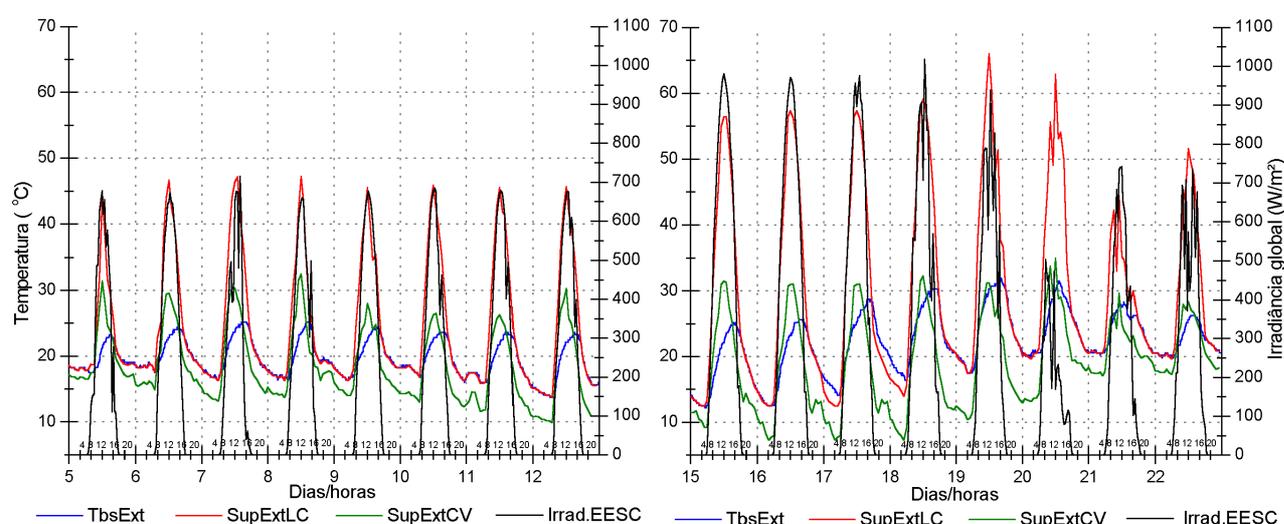


Figura 4.25: Comparação entre temperaturas superficiais externas da laje comum e da grama em situação de inverno (5 a 12 de junho (esquerda)) e de verão (15 a 22 de outubro (direita))

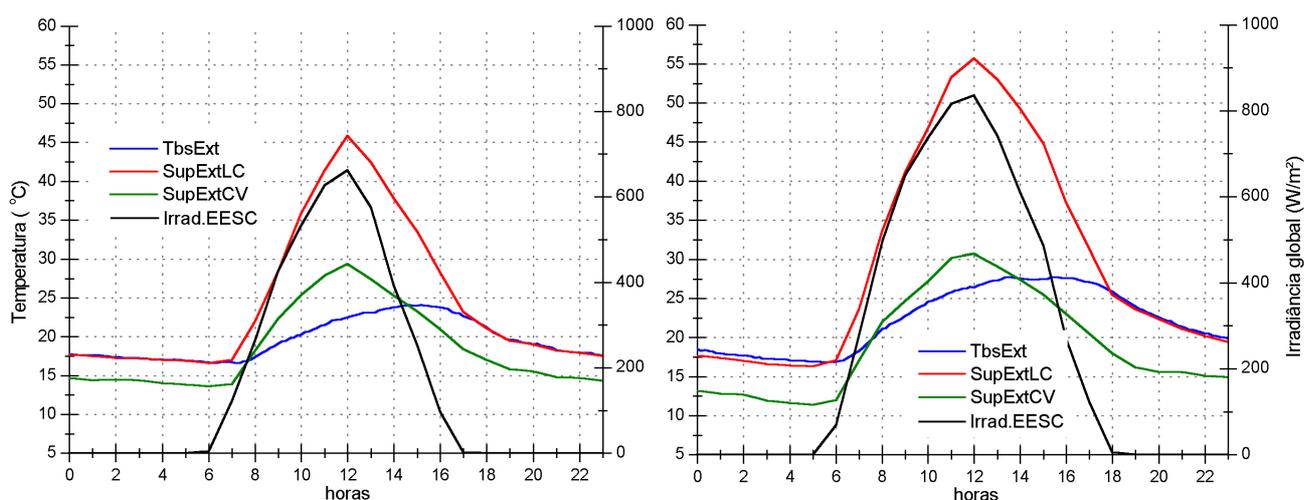


Figura 4.26: Comparação entre os valores médios das temperaturas superficiais externas da laje comum e da grama de em situação de inverno (esquerda) e verão (direita)

Comparando as curvas das temperaturas superficiais externas (estimadas), nota-se que, tanto no verão quanto no inverno, a temperatura superficial externa da laje comum (SupExtLC) apresentou maiores amplitudes térmicas do que a temperatura da superfície da grama da cobertura verde (SupExtCV). A maior diferença entre as máximas dessas temperaturas, 31°C , ocorreu durante o período de verão. No inverno essa mesma diferença foi de $14,8^{\circ}\text{C}$. As amplitudes térmicas médias e os gráficos das figuras Figura 4.25 e da Figura 4.26 evidenciam a maior suscetibilidade da laje comum à influência da irradiância solar de ondas longas. Em compensação, a camada de grama da cobertura verde a protege das cargas térmicas provenientes da irradiância solar global, uma vez que do total da irradiância solar que incide em uma cobertura verde, 27% são refletidos, 60% são absorvidos pelas plantas e 13% são transmitidos para o solo.

5 Conclusões

Este capítulo apresenta, de forma concisa, as análises conclusivas obtidas durante o capítulo anterior, Resultados e Discussão. São apresentadas, ainda, sugestões para pesquisas futuras.

5.1 Do desempenho térmico de inverno

Neste período, foi constatada a influência da grande área de elementos vazados da parede posterior da edificação, onde foi construído o protótipo, sobre as temperaturas do ar interno, visto que as mesmas não apresentaram variações consideráveis. Contudo, as temperaturas superficiais internas e externas (estimadas) apresentaram diferenças significativas.

As amplitudes térmicas médias, de 6,3°C e de 1,8°C, das temperaturas superficiais internas da laje comum e da cobertura verde, respectivamente. Essas mesmas, quando associadas aos seus coeficientes de amortecimento e atrasos térmicos, evidenciaram que a cobertura verde reduziu as flutuações térmicas diárias em cerca de 70% mais que a laje comum.

A temperatura superficial da grama, comparada com a temperatura superficial externa da laje comum, sofreu variações térmicas significativamente menores, cerca de 60% menos. A maior diferença entre elas foi de 19,4°C, quando a máxima atingida pela superfície de folhas foi 26,5°C, enquanto a máxima externa da laje comum atingiu 45,9°C, submetidas a uma irradiância solar de 665 W/m². Isto pode ser devido à capacidade da vegetação de reduzir o ganho de calor, uma conseqüência do efeito de refrigeração evaporativa.

Os coeficientes de amortecimento térmicos indicaram que a cobertura verde possui maior capacidade de reduzir as variações de temperatura tanto no próprio fechamento, quanto no interior do ambiente.

5.2 Do desempenho térmico de verão

O comportamento das curvas de temperaturas do ar interno e externo à edificação do protótipo revelou expressivas diferenças entre as mesmas. A maior diferença entre as máximas temperaturas do ar interno nos dois ambientes foi de 5,1°C. As máximas temperaturas do ar nos ambientes com cobertura verde e laje comum atingiram 31,1°C e 34,9°C, respectivamente.

No ambiente com cobertura verde houve uma redução do fluxo de calor de 20%. Neste sentido, o melhor desempenho da cobertura verde pode estar associado às funções biológicas da vegetação como fotossíntese e evapotranspiração, que absorvem parcelas significativas de irradiância solar, reduzindo, assim, a temperatura superficial interna da laje, amenizando as temperaturas do ar no interior da edificação durante o verão.

Quanto às temperaturas superficiais das faces internas das coberturas, que foram monitoradas usando-se as caixas térmicas, a cobertura verde reduziu cerca de 55% as variações térmicas diárias. A maior diferença entre elas, 27,2°C, ocorreu quando as máximas temperaturas superficiais internas das coberturas, com laje comum e com cobertura verde, atingiram 51,2°C e 24°C, respectivamente. Possivelmente, tal diferença que comprova quantitativamente o desempenho superior da cobertura verde, se deve à combinação das camadas de solo e vegetação, as quais proporcionam efeitos de sombreamento e refrigeração evaporativa, que protegem termicamente a cobertura das variações térmicas.

Das estimativas das temperaturas superficiais externas da laje comum e da grama, foram notadas relevantes diferenças entre essas temperaturas. A maior delas, 34,8°C, ocorreu quando a máxima temperatura da superfície de folhas atingiu 31,2°C e a mesma temperatura na superfície externa da laje comum alcançou 66°C. A temperatura na superfície da grama foi cerca de 40% menor do que a da laje comum. Estas diferenças podem estar associadas à capacidade da vegetação de irradiar e refletir menos calor solar, que reduz a quantidade calor reirradiado para o ambiente em torno do edifício, amenizando fenômenos térmicos urbanos como o de ilha de calor.

5.3 Da análise dos desempenhos térmicos de inverno e de verão

A temperatura do ar no interior do ambiente com cobertura verde se manteve mais estável do que a temperatura do ar no ambiente com laje comum, tanto no verão quanto no inverno. Contudo, as maiores amplitudes térmicas e diferenças entre essas temperaturas ocorreram no verão. No inverno, as maiores diferenças entre as máximas temperaturas do ar no interior dos ambientes das coberturas foram de 1,2°C e, no verão, 3,8°C. Isto pode ter ocorrido devido à função térmica isolante exercida pela cobertura verde, provocada pela camada de ar, quase em repouso, que se forma entre as folhas da camada de vegetação.

A temperatura superficial interna da cobertura verde se manteve mais resistente às variações térmicas diárias, tanto no inverno quanto no verão. As maiores diferenças das máximas temperaturas superficiais internas das coberturas foram de 3,4°C no inverno e, 25,1°C, no verão, quando foram constatadas as maiores amplitudes térmicas de ambas as temperaturas. Todavia, nesse período, a amplitude térmica média da temperatura superficial interna da laje comum superou em cerca de 90% a da cobertura verde em 25,7°C. Tais diferenças podem ser devido à maior capacidade da cobertura verde de amortecer as flutuações térmicas diárias, uma consequência da ação conjunta de sua maior espessura com a umidade retida na camada de solo.

Quanto às estimativas das temperaturas superficiais externas, percebeu-se que, tanto no verão quanto no inverno, a temperatura superficial externa da laje comum apresentou amplitudes térmicas 50% maiores do que a temperatura da superfície da grama da cobertura verde. A maior diferença entre as máximas dessas temperaturas, 31°C, ocorreu durante o período de verão. No inverno, essa mesma diferença foi de 14,8°C. As amplitudes térmicas médias e o comportamento das curvas das referidas temperaturas comprovaram a maior suscetibilidade da laje comum à influência da irradiância solar de ondas longas. Em compensação, a camada de grama da cobertura verde a protege das cargas térmicas provenientes da irradiância solar, uma vez que do total da irradiância solar que incide em uma cobertura verde, 27% são refletidos, 60% são absorvidos pelas plantas e 13% são transmitidos para o solo.

Diante de todo o exposto, pode-se concluir que as coberturas ajardinadas são alternativas técnica e economicamente viáveis para o clima local, não apenas para o tipo de edificação estudada, mas com amplas possibilidades de utilização. Adicionalmente, os benefícios ambientais destes sistemas extrapolam a própria edificação e atingem toda uma

região em torno da mesma, com melhoria da qualidade do ar e incorporação integrada e harmoniosa entre vegetação e áreas edificadas.

5.4 Sugestões para pesquisas futuras

Como sugestões para futuros estudos acerca do tema coberturas verdes, podem ser investigados, entre outros, os seguintes assuntos:

- Desempenho de coberturas verdes como técnica de refrigeração passiva em climas quentes e secos;
 - Desempenhos térmicos de coberturas verdes de diferentes espessuras e espécies de vegetação;
 - Os efeitos da utilização de coberturas verdes sobre o consumo energético de edifícios institucionais, comerciais e residenciais;
 - Determinação específica das propriedades termofísicas das coberturas verdes;
 - Custos relativos à implantação e manutenção de coberturas verdes e sua influência sobre a estrutura dos edifícios.
-

Referências

AKBARI, H. Shade trees reduce building energy use and CO₂ emissions from power plants. **Environmental Pollution**, v. 116, p. S119-S126, 2002.

AL SANEH, S. A. Thermal performance of building roof elements. **Building and Environments**. v. 37, n. 7, p. 665-675, 2002.

ALLEN, R. G. *et al.* **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO. Rome, 1998. Disponível em : <<http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e00.htm#Contents>>. Acesso em: 10 nov. 2003.

ARAVANTINOS, D. G. *et al.* **The influence of a planted roof on the passive cooling of buildings**. Disponível em: <<http://www.kenes.com/lises/Abstracts/Htm/0075.htm>>. Acesso em: 24 ago. 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto de normas de desempenho térmico de edificações 02:135. 07-001 – Parte 1: definições, símbolos e unidades**. São Paulo. 2003.

BRASIL. Ministério de Agricultura e Reforma Agrária. **Normais climatológicas (1961-1990)**. Brasília: Ministério de Agricultura e Reforma Agrária, 1992.

CAPECE, J. C. *et al.* **Comparison of evapotranspiration estimation methods**. University of Florida. Department of Agricultural and Biological Engineering. Institute of Food and Agricultural Sciences. 2002. Disponível em : <http://www.maerc.com/weather/ET_methods_report_020626.doc>. Acesso em: 22 nov. 2003.

CORREA, C. B.; GONZÁLEZ, F. J. N. O uso de coberturas ecológicas na restauração de coberturas planas. In: NÚCLEO DE PESQUISA EM TECNOLOGIA DE ARQUITETURA E URBANISMO-NUTAU. **Anais...** São Paulo: Pró-reitoria de Pesquisa, Universidade de São Paulo, 2002.

COST of green roofs. Publicação eletrônica. Disponível em: <http://www.lid-stormwater.net/greenroofs/greenroofs_cost.htm>. Acesso em: 18 set. 2002.

CURTIS, W. J. R. **Le Corbusier: ideas and forms**. Oxford: Paidon Press, 1986.

DE LORME, E. **Garden pavilions and the 18th century french court**. Suffolk: Antique Collector's, 1996.

DEL BARRIO, E. P. Analysis of the green roofs cooling potential in buildings. **Energy in Buildings**, v. 27, n. 2, p. 179-193, 1998.

DIMOUD, A.; NIKOLOPOULOU, M. Vegetation in the urban environment: microclimatic analysis and benefits. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 1, p. 69-76, 2003.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Clima e hidrologia**. Disponível em: <<https://www.cppse.embrapa.br/>> . Acesso em: 20 ago. 2002.

ETEMENANKI... **Etemenanki: the tower of babel**. Disponível em: <<http://www.livius.org/es-ez/etemenanki/etemenanki.html>>. Acesso em: 15 mar. 2004.

EUMORFOPOULOU, E.; ARAVANTINOS, D. The contribution of a planted roof to the thermal protection of buildings in Greece. **Energy and Buildings**, v.27, n. 4, p.29-36, 1998.

GIVONI, B. **Man, climate and architecture**. 2 ed. London: Applied Science Publishers Ltd, 1976.

GOMEZ, F. *et al.* Vegetation and climatic changes in a city. **Ecological Engineering**, v. 10, n. 4, p. 355-360, 1998.

H08FAMILY. **H08family**. 1 fotografia, color. Disponível em: <http://www.onsetcomp.com/Products/Product_Pages/HOBO_H08/H08family.html>. Acesso em: 09 ago. 2002.

HARAZONO, Y. *et al.* Effects of rooftop vegetation using artificial substrates on the urban climate and the thermal load of buildings, **Energy and Buildings**. v. 15, n. 3-4, p. 435-442, 1991.

HISTORY. **History**. 1 fotografia, color. Disponível em: <<http://www.greenroofs.com/history.htm>>. Acesso em: 17 set. 2002.

HOBO®... **HOBO®...H8 family of data loggers**. Disponível em: <http://www.onsetcomp.com/Products/Product_Pages/HOBO_H08/H08family.html#Anchor-HOBO-35882>. Acesso em: 09 ago. 2002.

HOBOSHUTTLE. **Hoboshuttle**. 1 fotografia, color. Disponível em: <http://www.onsetcomp.com / Products /Product_Pages/temperature_pages/2570_HOBOshuttle.html>. Acesso em: 15 abr. 2003.

JARDINSUS. **Jardinsus**. 1 fotografia, p&b. Disponível em: <<http://www.angelfire.com/me/babiloniabrasil/jardinsus.html>>. Acesso em: 17 set. 2002.

JOHNSTON, J.; NEWTON, J. **Building green: a guide for using plants on roofs, walls and pavements**. London: The London Ecology Unit, 1996.

KARVONEN, T. **Computation of Potential Evapotranspiration, Crop Energy Balance and Leaf Photosynthesis**. Disponível em : <http://www.water.hut.fi/wr/kurssit/Yhd-12.112/dload/energy_LE2.doc>. Acesso em: 15 dez. 2003.

KAWASHIMA, S. Effect of vegetation on surface temperature in urban and suburban areas in winter, **Energy and Buildings**, v. 15, n. 3-4, p. 465-469, 1991.

LAAR, M. *et al.* Estudo de aplicação de plantas em telhados vivos extensivos em cidades de clima tropical. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO-ENCAC, 6. **Anais....** São Pedro, São Paulo: ANTAC, 2001. 1 CD-ROM.

LAKE, T. **Does it pay to go green? A cost-benefit analysis of green roofs in the NYC metropolitan area.** Disponível em: <<http://www.barnard.columbia.edu/envsci/courses/BC3800-01/PresentationsF2003/LakeTimPresentation.ppt>>. Acesso em: 24 nov. 2003.

LYONSSCHOOLGR. **Lyonsschoolgr.** 1 fotografia, color. Disponível em:<<http://construction.ntu.ac.uk/staffwebs/greenroofs/images/LyonsSchoolGR.gif>>. Acesso em: 25 set. 2002.

MACHADO, M. V.; BRITTO, C.; NEILA, F. J. Thermal behaviour simulation of models with ecological roofs. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PASSIVE AND LOW ENERGY ARCHITECTURE-PLEA, 18. **Anais...** Austrália: Brisbane, University of Queensland, 1999.

MACHADO, M. V.; BRITTO, C.; NEILA, J. La conductividad térmica equivalente en la cubierta ecológica. In: ENCONTRO NACIONAL SOBRE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO-ENCAC, 6. **Anais...** São Pedro, São Paulo: ANTAC, 2001.

MAIN5. **Main5.** 1 fotografia, color. Disponível em: <<http://www.greenroof.co.uk/html/main5.htm#stfagans>>. Acesso em: 17 set. 2002.

MAPA_UFSCAR600. **Mapa_Ufscar600.** 1 fotografia, color. Disponível em: <<http://www.ufscar.br/português/local/local.html>>. Acesso em: 29 mai. 2002.

MAPA-BRASIL. **Mapa-Brasil.** 1 fotografia, color. Disponível em: <<http://www.alltech-on.com/imagens/Mapa-Brasil.jpg>>. Acesso em: 16 jul. 2002.

MERCIER, G. "Energy Sector"; in **Canada Country Study: Climate Impacts and Adaptation**, Environment Canada, 1998.

MORGADO, J. M. Coberturas verdes. **Impermeabilizar.** São Paulo, n. 78, p. 62-76, fev. 1995.

NEUTROL, **Neutrol, tinta asfáltica para concreto, alvenaria, metais e madeiras.** Disponível em: <<http://www.vedacit.com.br/novo2003/perfil/co.php?p=produtos&a=produto&id=64>>. Acesso: 18 abr. 2003.

NIACHOU, A. *et al.* Analysis of the green roof thermal properties and investigation of its energy performance. **Energy and Buildings**, v. 33, n. 7, p. 719-729, 2001.

ONMURA, S. *et al.* Study on evaporative cooling effect of lawn gardens. **Energy and Buildings**, v.33, n. 7, p.653-666, 2001.

OSMUNDSON, T. **Roof gardens: history, design, and construction.** New York: W. W. Norton & Company, Inc., 1999.

PECK, S. W. *et al.* **Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada.** Peck and Associates. Disponível em: <<http://greenroofs.ca/grhcc/Greenbacks.pdf>>. Acesso em: 15 ago. 2002.

PEREZ JÚNIOR, O. R. **A cidade de São Carlos.** Disponível em: <http://educar.sc.usp.br/biologia/textos/m_a_txt6.html>. Acesso em: 20 mar. 2002.

PLANNING GUIDE. **The green roof.** 1 fotografia, p&b 6. ed. © Zinco GmbH. Grabenstraße 33, D – 72669. Alemanha: Unterensingen, 2000a.

PLANNING GUIDE. **The green roof.** 1 fotografia, p&b 6. ed. © Zinco GmbH. Grabenstraße 33, D – 72669. Alemanha: Unterensingen, 2000b.

PLANNING GUIDE. **The green roof.** 1 fotografia, p&b 6. ed. © Zinco GmbH. Grabenstraße 33, D – 72669. Alemanha: Unterensingen, 2000c.

PONCE, V. M. **The Penman – Monteith Method.** Disponível em: <http://ponce.sdsu.edu/penman_monteith_11/penman_monteith_11.html>. Acesso em: 15 dez. 2003.

POUEY, M. T. F. **Estudo experimental do desempenho térmico de coberturas planas–Vegetação e Terraço.** 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998a.

POUEY, M. T. F. *et al.* Coberturas verdes: análise do desempenho térmico. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO-ENTAC, 7. **Anais...** Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção, Universidade Federal de Santa Catarina, 1998b.

RAZA, S. H. *et al.* Effect of vegetation on urban climate and healthy urban colonies. **Energy and Buildings**, v. 15, n. 3-4, p. 487-491, 1991.

RIVERO, R. **Arquitetura e clima: condicionamento térmico natural.** Porto Alegre: D. C. Luzzatto Editores: Ed.da Universidade, UFRGS, 1985.

ROMERO, M. A. B. **Princípios bioclimáticos para o desenho urbano.** São Paulo: ProEditores, 2000. p. 31-32.

ROOFTOP02. **Rooftop02.** 1 fotografia, color. Disponível em: <<http://www.schundler.com/rooftop02.jpg>>. Acesso em: 07 abr. 2003.

ROOFTOP02b. **Rooftop02b.** 1 fotografia, color. Disponível em: <<http://www.schundler.com/rooftop02b.jpg>>. Acesso em: 07 mai. 2003.

RORIZ, M. **Jardim 1.0 – Temperaturas Superficiais em Vegetação.** Versão 1.0. **JARDIM.EXE.** São Carlos, 2003. Aplicativo. 264KB.

THE cost. Publicação eletrônica. Disponível em: <http://www.ecoroofsystms.com/cost_files/c_cost.html>. Acesso em: 23 set. 2002.

THECHASE2. **Thechase.** 1 fotografia, color. Disponível em: <<http://www.construction.ntu.ac.uk/staffwebs/greenroofs/images/thechase2.jpg>>. Acesso em: 25 set. 2002.

THEODOSIOU, T. G. Summer period analysis of the performance of a planted roof as a passive cooling technique. **Energy and Buildings**, v. 35, n. 9, p. 909-917, 2003.

TREBILCOCK, M. E. Appropriate technologies for the design of green roofs. In: NÚCLEO DE PESQUISA EM TECNOLOGIA DE ARQUITETURA E URBANISMO-NUTAU. **Anais...** São Paulo: Pró-reitoria de Pesquisa, Universidade de São Paulo, 1998.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Tabelas de dados. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada. Escola de Engenharia de São Carlos. *CRHEA~4.xls; CRHAE~10.xls*. São Carlos, 2003a. 1 disquete.

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. Tabelas de dados. Departamento de Hidráulica e Saneamento. Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada. Escola de Engenharia de São Carlos. *USP03Jun.txt; USP03Out.txt*. São Carlos, 2003b. 1 disquete.

VELAZQUEZ L. S. **Why have a test of green roof?** Disponível em: <<http://www.greenroofs.com>>. Acesso em: 16 jul. 2002.

VITTORINO, F.; SATO, N. M. N.; AKUTSU, M. Desempenho térmico de isolantes refletivos e barreiras radiantes aplicados em coberturas. **Téchne**, São Paulo, n.75, p. 66-70, jun. 2003.

WILMERS, F. Effects of vegetation on urban climate and buildings. **Energy and Buildings**, v. 15, n. 3-4, p. 507-514, 1990-1991.

WONG, N. H. *et al.* Investigation of thermal benefits of rooftop garden in the tropical environment. **Building and Environment**, v. 38, n. 2, p. 261-270, 2003b.

WONG, N. H. *et al.* Life cycle cost analysis of rooftop gardens in Singapore. **Building and Environment**, v. 38, n. 3, p. 499-509, 2003c.

WONG, N. H. *et al.* The effects of rooftop garden on energy consumption of a commercial building in Singapore. **Energy and Buildings**, v.35, n. 2, p. 353-364, 2003a.

Z_FACTORY1. **Z_factory1**. 1 fotografia, color. Disponível em: <http://www.greenroofs.com/z_factory1.jpg>. Acesso em: 07 mai. 2003.

ZIGURAT. **Zigurate**. 1 fotografia, p&b. Disponível em: < <http://www.Specialtyinterests.net/zigurat.html> >. Acesso em: 28 out. 2003.

ZIPPERER, W. C. ZIPPERER C. E. Vegetation responses to changes in design and management of an urban park. **Landscape and Urban Planning**. v. 22, n. 1, Sep., p. 1-10, 1992.

ZÖLD, A.; SZOKOLAY, S. V. Thermal insulation design tools and techniques. **PLEA notes**. Passive and Low Energy Architecture International. Department of Architecture. Brisbane: University of Queensland, 1997.

Anexo A

Tabela A.1: Cargas de materiais construtivos comuns

Fonte: OSMUNDSON, 1999, p. 293-294.

Material	kg/m³
Aço	7,945
Água	1,013
Ardósia	2,595 – 2,919
Areia e cascalho	1,865
Areia seca	1,460 – 1784
Areia úmida	1,784 – 2,108
Argila	2,627
Argila expandida	649 – 730
Bloco cerâmico	1,856
Bloco de concreto	811 – 973
Bronze	8,318
Calcário argiloso seco	1,298
Calcário argiloso úmido	1,946
Cascalho	1,946
Concreto armado	2,433
Concreto leve	1,298 – 1,622
Concreto pré-moldado	2,108
Ferro fundido	7,297
Granito	2,757
Húmus seco	568
Húmus úmido	1,330
Madeira maciça	730
Madeira ôca	568
Mármore	2,757
Pedra calcária	2,514
Pedra de areia (arenito)	2,352
Pedra-pomes	649
Seixo	1,946
Solo argiloso compactado seco	1,216 – 1,622
Solo argiloso compactado úmido	2,027
Solo especial comercial	1,784
Turfa seca	154
Turfa úmida	165

Anexo B

Tabela B.1: Cargas de alguns materiais utilizados na superfície de coberturas verdes

Fonte: OSMUNDSON, 1999, p. 294-295.

Material	kg/m³
Areia fina seca	1,446
Areia fina úmida	1,928
Serragem seca de cedro com fertilizante	148
Serragem úmida de cedro com fertilizante	208
Turfa e musgo secos	154
Turfa e musgo úmidos	165
Lava vulcânica seca	803
Lava vulcânica úmida	863
Serragem seca de madeira vermelha	237
Serragem úmida de madeira vermelha	356
Vermiculita grossa seca	100
Vermiculita média seca	92
Vermiculita fina seca	120

Anexo C

Tabela C.1: Profundidades mínimas da camada de solo

Fonte: OSMUNDSON, 1999, p. 298.

Vegetação	Espessura mínima (cm)
Gramados	20 – 30
Flores	26 – 30
Arbustos	60 – 75
Árvores baixas	75 – 100
Árvores altas	122 – 152

Anexo D

Tabela D.1: Espécies de plantas utilizadas em coberturas verdes

Fonte: OSMUNDSON, 1999, p. 299 – 300.

Nome científico	Nome popular
<i>Agapanthus africanus</i>	Agapantos
<i>Antirrhinum majus</i>	Boca de leão
<i>Aptenia corsifolia</i>	Aptenia
<i>Asparagus densiflorus</i>	Aspargo-rabo-de-gat-, aspargo-pluma
<i>Axonopus compressus</i>	Gramma São Carlos
<i>Begonia cucullata</i>	Begônia sempre florida
<i>Bulbine frutescens</i>	Cebolinha, bulbine
<i>Buxus sempervirens</i>	Buxinho, buxo, árvore-de-caixa
<i>Celosia argentea</i>	Crista de galo
<i>Chamaecyparis obtusa nana gracilis</i>	Cipreste de hinochi
<i>Chamaecyparis pisifera filifera aurea</i>	Tuia macarrão
<i>Chrysanthemum paludosum</i>	Margarida mini
<i>Cornus florida</i>	Cornos, pink-dog-wood
<i>Cotoneaster congesta</i>	Cotoneaster, bonsai
<i>Cotoneaster dammeri</i>	Cotoneaster
<i>Cryptomeria japonica</i>	Pinheiro vermelho
<i>Cunninghamia lanceolata</i>	Cuningania
<i>Cupressus sempervirens</i>	Cipreste italiano
<i>Dahlia pinnata</i>	Dália mini
<i>Daphne cneorum</i>	Louro
<i>Duranta repens</i>	Pingo de ouro
<i>Euonymus fortunei vegetus</i>	Evônimo
<i>Ficus pumila</i>	Unha de gato
<i>Hedera canariensis</i>	Hera batata
<i>Hypericum spp.</i>	Milfurada
<i>Ilex aquifolium</i>	Azevinho
<i>Ilex cornuta</i>	Arbusto chinês, bonsai
<i>Ilex crenata convexa</i>	Ilex
<i>Ixora chinensis</i>	Ixora chinesa
<i>Jasminum mesnyi</i>	Jasmim amarelo
<i>Juniperus chinensis pfitzioriana</i>	Junipero chinês
<i>Juniperus chinensis torulosa</i>	Tuia kaizuka
<i>Juniperus horizontalis</i>	Pinheiro rasteiro
<i>Ligustrum sinense</i>	Ligustrinho verde
<i>Liripoe muscari</i>	Barba-de-serpente

<i>Magnólia X soulangeana</i>	Magnólia
<i>Mahonia bealei</i>	Mahonia
<i>Paspalum notatum</i>	Gramma batatais
<i>Pedilanthus tithymaloides</i>	Dois amores, dois irmãos, sapatinho-de-judeu
<i>Pilea microphylla</i>	Brilhantina
<i>Plumbago capensis</i>	Bela Emília
<i>Portulaca grandiflora</i>	Portulaca, onze-horas
<i>Pyracantha coccinea</i>	Piracanta
<i>Raphiolepis umbellata</i>	Rosinha da Índia
<i>Rhododendron Exbury hybrids</i>	Azaléia rosa
<i>Rhododendron prunifolium</i>	Azaléia
<i>Rosa chinensis</i>	Rosa mini
<i>Senecio confusus</i>	Jalisco, margaridão, flama-do-méxico
<i>Spiraea incisa</i>	Flor-de-noiva
<i>Stenotaphrum secundatum</i>	Gramma Santo Agostinho
<i>Suculentas</i>	Suculentas
<i>Thuia occidentalis</i>	Tuia áurea
<i>Thunbergia erecta</i>	Tumbergia azul arbustiva
<i>Tradescantia pallida</i>	Coração roxo, tapueraba
<i>Tradescantia spathacea</i>	Abacaxi roxo, Moisés-no-berço
<i>Tradescantia zebrina</i>	Tapueraba roxa, lambari roxo.
<i>Viburnum plicatum tomentosum</i>	Viburno
<i>Viburnum tinus</i>	Laurotino
<i>Viola x wittrockiana</i>	Amor perfeito
<i>Zoysia japonica</i>	Gramma esmeralda

Anexo E

Tabela E.1: Exemplo de arquivo de dados do programa Jardim 1.0

Fonte: RORIZ, 2003.

Latitude		Altitude		Mês		Dia		Hven		Hveg		Albedo	
-22.00		800		2		25		2.00		0.15		Var	
Hora (solar)	RadET (W/m ²)	RadGlb (W/m ²)	RadLon (W/m ²)	RadLiq (W/m ²)	EnEVP (W/m ²)	TxEVP (mm/h)	UmiRel (%)	Vento (m/s)	TBS (°C)	TSA (°C)	TsV (°C)		
0	0	0	66	-66	-33	-0.048	96.0	1.5	20.2	20.1	17.9		
1	0	0	66	-66	-33	-0.049	97.0	1.6	20.1	20.0	18.0		
2	0	0	65	-65	-34	-0.050	98.0	1.6	20.0	19.9	18.0		
3	0	0	66	-66	-36	-0.053	99.0	1.6	19.5	19.4	17.5		
4	0	0	65	-65	-36	-0.053	99.0	1.5	19.8	19.7	17.8		
5	0	0	66	-66	-37	-0.054	99.0	1.4	19.7	19.6	17.6		
6	24	22	70	-64	-33	-0.048	98.0	1.5	18.6	19.3	16.5		
7	217	184	64	71	49	0.072	95.0	1.5	21.1	27.5	22.6		
8	464	459	55	305	217	0.320	87.0	1.4	25.1	41.2	31.6		
9	687	627	66	439	364	0.538	64.0	1.7	28.7	50.7	33.3		
10	857	728	64	531	433	0.641	63.0	1.7	29.5	55.1	35.4		
11	971	893	71	664	550	0.815	55.0	1.8	30.6	62.0	37.1		
12	1014	935	73	698	585	0.867	52.0	1.7	31.2	64.1	38.1		
13	971	920	75	682	584	0.866	50.0	1.9	31.6	63.9	36.9		
14	857	841	73	613	540	0.802	49.0	1.6	32.5	62.0	37.2		
15	687	584	73	397	389	0.577	49.0	1.7	32.5	53.0	33.0		
16	464	394	76	233	273	0.406	48.0	1.7	32.3	46.1	29.9		
17	217	184	72	62	143	0.212	50.0	1.6	32.3	38.7	27.1		
18	24	20	68	-62	27	0.039	58.0	1.4	30.3	30.9	23.8		
19	0	0	64	-64	4	0.005	70.0	1.4	27.2	27.1	22.2		
20	0	0	52	-52	-18	-0.026	89.0	1.4	25.3	25.2	22.8		
21	0	0	56	-56	-16	-0.023	88.0	1.6	24.6	24.5	22.0		
22	0	0	55	-55	-26	-0.039	95.0	1.5	23.4	23.3	21.5		
23	0	0	56	-56	-30	-0.044	97.0	1.5	22.7	22.6	20.9		

Hven: Altura média do vento

Hveg: Altura média da vegetação

RadET: Radiação Extraterrestre

RadGlb: Radiação Global

RadLon: Radiação em ondas longas

RadLiq: Radiação Líquida

EnEVP: Energia de Evaporação

TxEVP: Taxa de Evaporação

UmiRel: Umidade Relativa do ar

Vento: Velocidade do vento

TBS: Temperatura do ar

TAS: Temperatura sol-ar

TsV: Temperatura superficial da Vegetação