IARA LIMA FERRAZ

**O DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA DE COBERTURA
VERDE EM COMPARAÇÃO AO SISTEMA TRADICIONAL DE
COBERTURA COM TELHA CERÂMICA.**

**São Paulo
2012**

IARA LIMA FERRAZ

**O DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA DE COBERTURA
VERDE EM COMPARAÇÃO AO SISTEMA TRADICIONAL DE
COBERTURA COM TELHA CERÂMICA.**

Dissertação de Mestrado apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração:
Engenharia de Construção Civil e Urbana

Orientadora:
Prof^ª. Dr^ª. Brenda Chaves Coelho Leite

São Paulo
2012

IARA LIMA FERRAZ

**O DESEMPENHO TÉRMICO DE UM SISTEMA DE COBERTURA
VERDE EM COMPARAÇÃO AO SISTEMA TRADICIONAL DE
COBERTURA COM TELHA CERÂMICA.**

Dissertação de Mestrado apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
como parte dos requisitos para a obtenção do
título de Mestre em Engenharia Civil.

São Paulo
2012

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 25 de maio de 2012.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Ferraz, Iara Lima

**O desempenho térmico de um sistema de cobertura verde em comparação ao sistema tradicional de cobertura com telha cerâmica / I.L. Ferraz. -- ed.rev. -- São Paulo, 2012.
150 p.**

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil.

**1.Coberturas (Desempenho) 2.Edificações (Desempenho)
3.Sustentabilidade 4.Cerâmica 5.Economia de energia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil II.t.**

DEDICATÓRIA

À minha família,

*Jurema Lima de Siqueira, minha mãe,
Pessoa maravilhosa e admirável,
E Rafael Lima Ferraz, meu irmão,
Pessoinha a quem quero tanto bem*

*Só nós sabemos o caminho que nos
trouxe até aqui.*

AGRADECIMENTOS

A Deus e aos anjos da guarda que zelaram pela concretização deste objetivo.

A Carlos Eduardo Zabeu Penna, amor da minha vida, pelos tantos momentos de paciência, compreensão e força.

A Brenda Chaves Coelho Leite, minha orientadora querida que sempre fez todo o possível para que tudo desse certo.

A Capes e a FAPESP pelo incentivo.

A Hélio Florença Faria e a equipe da Novus Automation, Fábio Augusto Gallo, Carlos Bacellar e equipe da Lwart Química, Paulo César da Silva e P.G. Construtora, Holcim Brasil, Eduardo Menoncello, Renata Maré e Oswaldo, Bruno Choi, Weverton de Souza, Samantha Martins e equipe do IAG, Reginaldo Mariano e equipe do Hall Tecnológico, e principalmente João, meu braço direito na manutenção das plantas.

Aos professores Racine Prado, Arlindo Tribess, João Petreche, Sérgio Leal, Fernando Kurokawa, Fabiano Corrêa, Eduardo Toledo, Cheng Lyiang Yee, Silvio Melhado, Lúcia Helena de Oliveira, Fernando Marinho

Aos amigos Ricardo e Jussara Penna, Marcos e Alana, Tarsila Miyazato, André Cespede, Isidório Novaes, Edinei Júnior, Vítor Nóbrega, Gabriela César, Igor Daurício e Cristiane Tieme, João Aurélio e Claus Rieger e à minha amiga do coração Chreichi Lopes, que foram solidários, curiosos e torcedores.

A todas as pessoas queridas da minha família chamada Pa-kua.

Aos meus amigos da FAU, da POLI, do Tibá, e de todos os lugares que me permitiram agregar mais conhecimento ao longo desta jornada.

Ao Pongo, Sid, Batatinha (in memorian), Yankee, Cristal, Mel e Juju pelos momentos espontâneos de felicidade.

E todos que, de uma maneira ou de outra, contribuíram para que esta pesquisa pudesse ser concluída, a todos vocês, muito obrigada!

RESUMO

As coberturas verdes fazem parte da arquitetura vernacular há séculos como solução para regulação térmica das edificações, retardando a transferência de calor para o ambiente interno e, no inverno, retardando as perdas de calor dos ambientes internos para o exterior da edificação (*International Green Roof Association* - IGRA). Em se adotando cobertura verde em edificações supõe-se haver economia no consumo de energia para se obter condições de conforto térmico nos ambientes. Baseado nessa suposição foi realizada uma pesquisa experimental onde, por meio de um estudo comparativo entre dois tipos de cobertura: a verde e a de telhas cerâmicas comprovou-se o potencial de economia de energia. A análise do comportamento térmico das coberturas verdes foi realizada por meio de coleta de dados de variáveis ambientais, durante um período de 10 meses, de um protótipo instrumentado, construído no Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP, São Paulo. Os dados levantados foram comparados com os dados de um segundo protótipo de mesmas dimensões e igualmente instrumentado, com cobertura cerâmica, sob as mesmas condições ambientais. A comparação dos resultados e análises em dias e episódios representativos de cada estação comprovaram a eficiência das coberturas verdes para retardar o ganho térmico da edificação. Espera-se que os resultados sejam incentivadores à larga aplicação dos telhados vegetados, o que trará diversas vantagens para a população.

PALAVRAS-CHAVE: Cobertura verde, telhado vegetado, cobertura cerâmica, desempenho térmico, economia de energia, edificação sustentável.

ABSTRACT

Green roofing is been a part of the vernacular architecture for centuries as solution for constructions thermal regulation. It is known that they delay the heat transfer from the outside to the inside of the building, and during winter, they delay the heating loss from the inside to the outside of the building (International Green Roof Association - IGRA). By adopting green roofs in buildings, one assumes that there is economy in energy consumption to obtain conditions of thermal comfort in inner environments. Based on this assumption, an experimental research was accomplished where, through a comparative study between two types of roofing systems: green and ceramics, it was determined this energy saving potential of green roofs. The analysis of the green roofing thermal behavior was realized through data collection of environmental variables, during the period of ten months, from an instrumented prototype constructed at the Polytechnic School of the University of São Paulo, São Paulo. The collected data was compared to those of a second prototype with the same dimensions and equally instrumented, with ceramics roofing, under the same environmental conditions. The data comparison and analysis of specific days in each season, proved the green roof efficiency on retarding the building thermal gain. One expects that the results will encourage the application of green roofs, which will bring several advantages to the population.

Keywords: Green roofs, vegetated roofs, thermal performance, energy saving, sustainable construction.

LISTA DE FIGURAS

Capítulo 2	Figura 2.1 - Figura 2.1 - Exemplo de Cobertura Verde Extensiva	12
	Figura 2.2 - Academia de Ciências da Califórnia, São Francisco	12
	Figura 2.3 - Exemplo de Cobertura Verde Semi-Intensiva	13
	Figura 2.4 - Exemplo de Cobertura Verde Intensiva	13
	Figura 2.5 - Millenium Park, Chicago	14
	Figura 2.6 - Cobertura espontânea de gramíneas crescendo sobre telhado	19
	Figura 2.7 - Cobertura espontânea de cactos crescendo sobre telhado	19
 Capítulo 3	 Figura 3.1 - Localização da cidade de São Paulo	 20
	Figura 3.2 - Zoneamento Bioclimático Brasileiro	21
	Figura 3.3 - Zona Bioclimática 3	22
	Figura 3.4 - Carta Bioclimática apresentando as normais climatológicas de cidades desta zona, destacando a cidade de Florianópolis, SC	22
	Figura 3.5 - Localização dos protótipos na POLI – USP	25
	Figura 3.6 - Projeto Esquemático dos Protótipos	27
	Figura 3.7 – Esquema da cobertura de P1	29
	Figura 3.8 – Propriedades térmicas da cobertura de telha cerâmica com forro de PVC	32
	Figura 3.9 - Gabarito para fundação	32
	Figura 3.10 - Fundação tipo radier	32
	Figura 3.11 - Formação das paredes	32
	Figura 3.12 - Pilares estruturais	32
	Figura 3.13 - Cura da laje e construção da platibanda	33
	Figura 3.14 - Teste de estanqueidade da impermeabilização	33
	Figura 3.15 - Montagem do telhado cerâmico	33
	Figura 3.16 - Aplicação de herbicida sobre laje impermeabilizada	33
	Figura 3.17 - Camada de proteção mecânica e camada drenante com argila expandida	33
	Figura 3.18 - Camada filtro e primeira camada de substrato	33
	Figura 3.19 - Grama amendoim	34
	Figura 3.20 - Grama amendoim após 3 meses e após adição de húmus	34

	Figura 3.21 – Grama amendoim após 10 meses do plantio	34
	Figura 3.22 – Grama amendoim após 13 meses do plantio	34
Capítulo 4	Figura 4.1 - Planta de Locação de Instrumentos	37
	Figura 4.2 - Locação de Instrumentos - Parede 1	38
	Figura 4.3 - Locação de Instrumentos – Parede 2	38
	Figura 4.4 - Locação de Instrumentos – Parede 3	39
	Figura 4.5 - Locação de Instrumentos – Parede 4	39
	Figura 4.6 – Termopar	43
	Figura 4.7 - Fieldlogger	43
	Figura 4.8 – RHT interno e externo	43
	Figura 4.9 – Conversor USB i485	43
	Figura 4.10 – Painel fechado	43
	Figura 4.11 – Painel de P1 aberto	43
	Figura 4.12 – Painel de P2 aberto	43
	Figura 4.13 – Tela de abertura do Software Superview	44
	Figura 4.14 – Tela de monitoração em tempo real do Software Superview	44
Capítulo 5	Figura 5.1 – Fluxo térmico através da cobertura verde para diferentes níveis de umidade – Efeito da umidade relativa no fluxo térmico	53

LISTA DE TABELAS E ORGANOGRAMAS

Capítulo 3	Tabela 3.1 - Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas para a Zona Bioclimática 3	22
	Tabela 3.2 - Tipos de vedações externas para a Zona Bioclimática 3	23
	Tabela 3.3 - Tabela 3.3: Estratégias de condicionamento térmico passivo para a Zona Bioclimática 3	23
	Tabela 3.4 - Detalhamento das estratégias de condicionamento térmico	23
	Tabela 3.5 - Aberturas para ventilação	23
	Tabela 3.6 - Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação	24
	Tabela 3.7 - Paredes	26
	Tabela 3.8 - Propriedades térmicas dos materiais utilizados	26
Capítulo 4	Tabela 4.1 - Especificação dos Sensores	40
	Tabela 4.2 - Dias Representativos da Estação – pré-seleção	47
	Tabela 4.3 - Dias Analisados nesta Pesquisa	52
	Organograma 4.1 - Hierarquia dos Sensores Permanentes em P1 e P2	42
Capítulo 5	Tabela 5.1 - Critério de Avaliação de Desempenho Térmico para Condições de Verão	79
	Tabela 5.2 - Critério de Avaliação de Desempenho Térmico para Condições de Inverno	79
	Tabela 5.3 - Limites para conforto de acordo com a NBR 6401/08	81

LISTA DE GRÁFICOS

Capítulo 5	Gráfico 5.1 – Temperatura superficial de teto em P1 e P2 no dia representativo de verão	55
	Gráfico 5.2 – Temperatura superficial de teto em P1 e P2 no dia representativo de inverno	56
	Gráfico 5.3 – Temperatura superficial de teto em P1 e P2 no dia mais quente da primavera	57
	Gráfico 5.4 – Temperatura superficial de teto em P1 e P2 no dia mais frio do inverno	58
	Gráfico 5.5 – Temperatura superficial de teto em P1 e P2 no dia com maior amplitude térmica da primavera	59
	Gráfico 5.6 – Temperatura superficial de teto em P1 e P2 no dia com menor amplitude térmica do inverno	60
	Gráfico 5.7 – Temperatura superficial de teto em P1 e P2 no dia com menor umidade relativa da primavera	61
	Gráfico 5.8 – Comportamento da parede 1 em P1 no dia representativo de verão	62
	Gráfico 5.9 – Comportamento da parede 2 em P1 no dia representativo de verão	62
	Gráfico 5.10 – Comportamento da parede 3 em P1 no dia representativo de verão	63
	Gráfico 5.11 – Comportamento da parede 4 em P1 no dia representativo de verão	63
	Gráfico 5.12 – Comportamento da parede 1 em P1 no dia representativo de inverno	64
	Gráfico 5.13 – Comportamento da parede 2 em P1 no dia representativo de inverno	64
	Gráfico 5.14 – Comportamento da parede 3 em P1 no dia representativo de inverno	65
	Gráfico 5.15 – Comportamento da parede 4 em P1 no dia representativo de inverno	65
	Gráfico 5.16 – Comportamento da parede 1 em P2 no dia representativo de verão	66
	Gráfico 5.17 – Comportamento da parede 2 em P2 no dia representativo de verão	67
	Gráfico 5.18 – Comportamento da parede 3 em P2 no dia representativo de verão	67
	Gráfico 5.19 – Comportamento da parede 4 em P2 no dia representativo de verão	68
	Gráfico 5.20 – Comportamento da parede 1 em P2 no dia representativo de inverno	68
	Gráfico 5.21 – Comportamento da parede 2 em P2 no dia representativo de inverno	69
	Gráfico 5.22 – Comportamento da parede 3 em P2 no dia representativo de inverno	69

	dia representativo de inverno	
	Gráfico 5.23 – Comportamento da parede 4 em P2 no dia representativo de inverno	70
	Gráfico 5.24 – Temperatura superficial de piso em P1 e P2 no dia representativo de verão	72
	Gráfico 5.25 – Temperatura superficial de piso em P1 e P2 no dia representativo de inverno	73
	Gráfico 5.26 – Temperatura e Umidade relativa do ar em P1 e P2 no dia representativo de verão	75
	Gráfico 5.27 – Temperatura e Umidade relativa do ar em P1 e P2 no dia representativo de inverno	75
	Gráfico 5.28 – Temperaturas do ar internas e externas e ponto de orvalho no dia representativo de verão	77
	Gráfico 5.29 – Temperaturas do ar internas e externas e ponto de orvalho no dia representativo de inverno	78
	Gráfico 5.30 – Temperaturas do ar, internas e externas, no dia representativo de verão	80
	Gráfico 5.31 – Temperaturas do ar, internas e externas, no dia representativo de inverno	81
	Gráfico 5.32 – Temperaturas do ar exterior – Comportamento mensal	83
	Gráfico 5.33 – Temperaturas do ar – Comportamento mensal em P1	84
	Gráfico 5.34 – Temperaturas do ar – Comportamento mensal em P2	85
	Gráfico 5.35 – Carga térmica no dia representativo de verão em P1 e P2	89
	Gráfico 5.36 – Carga térmica no dia representativo de verão em P1 e P2, necessária para atingir 24°C	90
	Gráfico 5.37 – Carga térmica no dia representativo de inverno em P1 e P2	91
	Gráfico 5.38 – Carga térmica no dia representativo de inverno em P1 e P2, necessária para atingir 24°C	92
Anexos		
	Gráfico A.1 – Comportamento da parede 2 em P1 no dia mais quente do inverno (parede com maior incidência solar)	101
	Gráfico A.2 – Comportamento da parede 2 em P2 no dia mais quente do inverno (parede com maior incidência solar)	101
	Gráfico A.3 – Comportamento da parede 3 em P1 no dia mais quente do inverno (parede com menor incidência solar)	102
	Gráfico A.4 – Comportamento da parede 3 em P2 no dia mais quente do inverno (parede com menor incidência solar)	102

solar)	
Gráfico A.5 – Comportamento da parede 2 em P1 no dia mais frio do outono (parede com maior incidência solar)	103
Gráfico A.6 – Comportamento da parede 2 em P2 no dia mais frio do outono (parede com maior incidência solar)	103
Gráfico A.7 – Comportamento da parede 3 em P1 no dia mais frio do outono (parede com menor incidência solar)	104
Gráfico A.8 – Comportamento da parede 3 em P2 no dia mais frio do outono (parede com menor incidência solar)	104
Gráfico A.9 – Comportamento da parede 2 em P1 no dia com maior amplitude térmica do verão (parede com maior incidência solar)	105
Gráfico A.10 – Comportamento da parede 2 em P2 no dia com maior amplitude térmica do verão (parede com maior incidência solar)	105
Gráfico A.11 – Comportamento da parede 3 em P1 no dia com maior amplitude térmica do verão (parede com maior incidência solar)	106
Gráfico A.12 – Comportamento da parede 3 em P2 no dia com maior amplitude térmica do verão (parede com maior incidência solar)	106
Gráfico A.13 – Comportamento da parede 2 em P1 no dia menor amplitude térmica do verão (parede com maior incidência solar)	107
Gráfico A.14 – Comportamento da parede 2 em P2 no dia menor amplitude térmica do verão (parede com maior incidência solar)	107
Gráfico A.15 – Comportamento da parede 3 em P1 no dia menor amplitude térmica do verão (parede com menor incidência solar)	108
Gráfico A.16 – Comportamento da parede 3 em P2 no dia menor amplitude térmica do verão (parede com menor incidência solar)	108
Gráfico A.17 – Comportamento da parede 2 em P1 no dia com menor umidade relativa da primavera (parede com maior incidência solar)	109
Gráfico A.18 – Comportamento da parede 2 em P2 no dia com menor umidade relativa da primavera (parede com maior incidência solar)	109
Gráfico A.19 – Comportamento da parede 3 em P1 no dia com menor umidade relativa da primavera (parede com menor incidência solar)	110
Gráfico A.20 – Comportamento da parede 3 em P2 no dia com menor umidade relativa da primavera (parede com menor incidência solar)	110
Gráfico A.21 – Umidade do ar no dia mais quente de outono	111

Gráfico A.22 – Umidade do ar no dia mais quente de verão	111
Gráfico A.23 – Temperatura do ar e umidade relativa no dia mais frio do verão	112
Gráfico 5.24 – Temperatura do ar e umidade relativa no dia com maior amplitude térmica do outono	112
Gráfico A.25 – Temperatura do ar e umidade relativa no dia com menor amplitude térmica da primavera	113
Gráfico A.26 – Temperatura do ar e umidade relativa no dia com menor umidade relativa do outono	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a.C.	Antes de Cristo
FLL	<i>The Landscaping and Landscape Development Research Society</i>
i485	Conversor de sinal para USB
IAG ou IAG/ USP	Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo
IGRA	<i>International Green Roof Association</i>
P1	Protótipo 1
P2	Protótipo 2
PVC	Policloreto de vinil
RHTs	Transmissores de temperatura e umidade
SP	Estado de São Paulo
Superview SCADA	<i>Supervisory Control and Data Acquisition</i>
USB	<i>Universal Serial Bus</i>
USP	Universidade de São Paulo

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
φ	Atraso Térmico
ρ	Densidade de Massa Aparente
λ	Condutividade Térmica
Δt	Diferença de temperatura do ar externo e interno
A	Área
c	Calor Específico
cm	Centímetros
CT	Capacidade Térmica
Fe.Co	Ferro/Constantan
FS_{o}	Fator Solar
h	Horas
$hh:mm:ss$	Horas, minutos e segundos
$hh:mm:ss.cs$	Horas, minutos, segundos e centésimos de segundos
kg/m^3	Quilograma por metro cúbico
$\text{kJ}/(\text{kg.K})]$	Quilo-Joule por quilograma Kelvin
$\text{kJ}/(\text{m}^2.\text{K})$	Quilo-Joule por metro quadrado Kelvin
m^2	Metro quadrado
m	Metro
mm	Milímetro
pH	Medida de potencial hidroeiónico
Q	Carga térmica
$\text{R\$}$	Unidade monetária em reais
T_{max}	Temperatura máxima
T_{min}	Temperatura mínima
TJ	Unidade de medida de calor Tera-Joule
U	Transmitância Térmica ou Coeficiente global de transferência de calor
W	Watts
$W/(\text{m.K})$	Watts por metro Kelvin
$W/\text{m}^2.\text{^{\circ}C}$	Watts por metro quadrado Graus Celsius
$W/\text{m}^2\text{K}$	Watts por metro quadrado Kelvin

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	ii
LISTA DE FIGURAS	iii
LISTA DE TABELAS E ORGANOGRAMAS	v
LISTA DE GRÁFICOS	vi
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	x
LISTA DE SÍMBOLOS	xi
SUMÁRIO	xii
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa	1
1.2 Objetivos	8
1.2.1 Geral	8
1.2.2. Específicos	9
2. COBERTURAS VERDES	10
2.1 História das Coberturas Verdes	10
2.2 Tipos de Coberturas Verdes	11
2.2.1 Cobertura Verde Extensiva	12
2.2.2 Cobertura Verde Semi-Intensiva	13
2.2.3 Cobertura Verde Intensiva	13
2.3 Benefícios das Coberturas Verdes	14
2.4 Componentes do Sistema Construtivo	15
2.4.1 Vegetação	15
2.4.2 Substrato	16
2.4.3 Drenagem e Camada Filtro	17
2.4.4 Impermeabilização e Camada Anti-raiz	17
2.4.5 Estrutura	18
2.5 Coberturas Verdes Espontâneas	18
3. PROCEDIMENTOS DE CONSTRUÇÃO DOS PROTÓTIPOS	20
3.1 Os Protótipos	21
3.1.1 Diretrizes para a Construção	21
3.1.2 Projeto Padrão dos Protótipos	24
3.1.3 Protótipo 1 – Cobertura Verde	28
3.1.4 A Cobertura Verde	29

3.1.5 Protótipo 2 – Cobertura Cerâmica	31
3.1.6 Memorial Fotográfico da Obra	32
4. PROCEDIMENTOS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS	35
4.1 Sistemas de Medição e Aquisição de Dados	35
4.1.1 Medição das Variáveis Internas e Externas	35
4.1.2 Descrição da Instrumentação	40
4.1.3 Período de Coleta de Dados	40
4.2 Tabulação dos Dados Coletados	41
4.2.1 Hierarquia da Automação de Coleta de Dados	41
4.2.2 Tratamento e Análise dos Dados	44
4.3 Seleção dos Dias Analisados	45
4.3.1 Determinação do Dia Representativo da Estação do Ano	46
4.3.2 Determinação dos Episódios Climáticos Representativos	48
5. ANÁLISE DOS RESULTADOS	53
5.1 Análise dos Resultados nos Dias Seleccionados	53
5.1.1 Análise das Temperaturas Superficiais de Piso, Parede e Teto	54
5.1.2 Análise da Temperatura e Umidade do Ar Interior	74
5.1.3 Análise da Temperatura de Ponto de Orvalho	77
5.2 Comparação do Desempenho de P1 e P2 com os Critérios da NBR 15575 nos Dias Representativos de Verão e Inverno	79
5.3 Comportamento Mensal de P1 e P2 no Período Analisado	82
5.4 Verificação do Potencial de Economia de Energia para Condicionamento Artificial	87
6. CONCLUSÕES	93
7. TRABALHOS FUTUROS	95
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
ANEXOS	101
Anexo 1	101

1. INTRODUÇÃO

A introdução desta dissertação apresenta a justificativa para escolha do tema, revisão do estado da arte das pesquisas sobre desempenho das coberturas verdes e objetivos da pesquisa.

1.1 JUSTIFICATIVA

Há algumas décadas, quando a malha urbana não era tão densa, a natureza estava presente nas cidades de maneira significativa. Com o desenvolvimento industrial e os projetos de urbanização do início do século XX, além da invenção do asfalto, que substituiria os pavimentos de pedra, as cidades lentamente tornar-se-iam lugares impermeáveis e não seriam mais mescladas à vegetação. O ecossistema, que antes era balanceado, portanto, capaz de absorver a água das chuvas e o excesso de radiação solar, sofreu considerável desequilíbrio (GETTER, K.L.; ROWE, D.B.; 2006).

Segundo Water Resources Group (1998) apud Getter e Rowe (2006), dois terços de toda a área impermeável são formados por áreas de estacionamento, ruas e estradas asfaltadas e construções. Ainda de acordo com Getter e Rowe (2006), toda esta perda de vegetação e o excesso de água que não é absorvido pelas áreas impermeáveis, combinados com a capacidade de alguns materiais em absorver calor, resultam em edificações com temperaturas internas mais altas que as normais de conforto. Além disso, quando as temperaturas externas às edificações são mais altas que as temperaturas dos arredores das cidades, ocorre um efeito conhecido como ilha de calor urbana.

À medida que as cidades se desenvolveram e este aumento de temperatura pôde ser percebido pela população, foram criados alguns dispositivos artificiais de resfriamento; entretanto, estes consomem energia em demasia e poluem a atmosfera à medida que mais e mais pessoas os utilizam.

O mundo está sofrendo as consequências de hábitos que se mostraram destrutivos ao longo dos anos. As novas gerações já têm consciência de tais danos. A missão da humanidade hoje é fazer com que estes erros não se repitam e reparar e preservar o que restou. Deve-se, portanto, descobrir e desenvolver tudo o que pode ser benéfico para o meio ambiente e para as cidades para que convivam integrados.

A cada dia aumenta a consciência da população para preservar e poupar recursos. Várias soluções de construção sustentável têm sido resgatadas da arquitetura vernacular e aplicadas nos projetos atuais e hoje as conhecemos como ecotécnicas. Lengen (2008) enumera algumas: moinhos de vento para a geração de eletricidade, drenagem através de monjolos, placas coletoras de energia solar, cisternas para conservação da água das chuvas, construção em bambu, purificador de água para reuso, sanitário seco e sanitário bason para compostagem, biodigestor para geração emergencial de energia, cobertura verde, entre outras soluções aplicáveis a edificações rurais.

Considerando que hoje habitamos cidades adoecidas pelo excesso de poluentes, que estas são grandes massas impermeáveis e sem cor, as coberturas verdes cumprem um importante papel ao aumentar a área permeável da malha urbana. Podem ajudar a diminuir o uso de aparelhos de ar condicionado nas edificações, a diminuir a temperatura do microclima, a atenuar os efeitos das ilhas de calor e a criar ambientes de convivência, entre outros benefícios de que se tem notícia.

Os telhados vegetados trazem muitas vantagens para o lugar onde estão inseridos e para seu entorno e uma delas é a redução da carga térmica no interior da edificação. Embora este tipo de cobertura ainda não seja adotado em larga escala no Brasil, alguns estudos sobre este assunto já foram realizados tanto em nosso país quanto no exterior e apresentaram resultados bastante animadores que justificariam, sem dúvida, o seu emprego.

Na pesquisa de Lopes (2007), a autora faz uma análise experimental comparativa entre o desempenho das coberturas verdes leves e outros quatro tipos de cobertura: telhas cerâmicas, telhas de aço galvanizado, telha de fibrocimento e laje pré-moldada cerâmica. As medições levaram em consideração as condições climáticas entre os dias 04 a 10 de outubro de 2004 (período que a autora escolheu como episódio representativo do fato climático), comparando os ganhos térmicos no período de transição entre as estações primavera e verão, em protótipos existentes no campus da Universidade de São Paulo, na cidade de São Carlos. Para a comparação do desempenho térmico, os principais parâmetros utilizados foram os registros dos valores das temperaturas superficiais internas e das temperaturas do ar interno. Através destes, a autora pôde concluir que a cobertura verde possui maior inércia e proporciona menor amplitude térmica que os outros sistemas de cobertura.

Liu e Baskaran (2003) desenvolveram um estudo para quantificar o desempenho térmico e a eficiência energética das coberturas verdes no Canadá. A pesquisa teve por objetivo identificar variações climáticas significativas e determinar os benefícios desta técnica

sob as condições climáticas canadenses. Uma cobertura foi dividida em duas partes igualmente cobertas com impermeabilizante betuminoso cinza claro; uma das metades, entretanto, foi coberta com uma camada de drenagem, uma camada filtro, substrato e vegetação adicionais, compondo a cobertura verde. Ambas foram instrumentadas para medir a temperatura superficial, a refletância solar, o ganho de calor, a umidade do solo, o microclima criado pela vegetação e o escoamento da água das chuvas. Os dados foram coletados por um período de 660 dias, entre novembro de 2000 e setembro de 2002. A partir desses dados os pesquisadores puderam concluir que a cobertura verde reduziu 95% do ganho e 26% da perda de calor. Além disso, as flutuações de temperatura, especialmente nos meses mais quentes, foram drasticamente reduzidas e a demanda de energia diária para condicionamento do espaço foi de 75% do que era anteriormente necessário.

Ainda, Del Barrio (1998), desenvolveu um modelo matemático para representar a dinâmica do comportamento térmico de coberturas verdes e fez a análise de seu potencial de resfriamento em períodos quentes, usando dados climáticos da cidade de Atenas, na Grécia. Através do modelo foi possível concluir que, para a redução eficiente dos fluxos de calor para o interior da edificação, no verão, devem-se utilizar plantas com muitas folhas, preferencialmente horizontais e utilizar solo leve e aerado, como turfa, para aumentar o atraso térmico. A autora não fez cálculos para o período de inverno.

Morais (2004) avaliou experimentalmente o comportamento térmico em uma mesma edificação instrumentada, dividida igualmente entre laje impermeabilizada e cobertura verde, no campus da Universidade Federal de São Carlos, na cidade de São Carlos – SP. As medições das variáveis climáticas foram feitas em dois períodos: maio e junho de 2003 para consideração das condições de inverno e outubro de 2003 para consideração das condições de verão. As variáveis medidas foram umidade relativa do ar, temperatura superficial interna e externa. A autora ainda comparou os dados levantados durante as medições com resultados estimados pelo software Jardim 1.0 para o mesmo local, e concluiu que o desempenho da cobertura verde foi mais estável e resistente às flutuações térmicas diárias do que o da laje impermeabilizada, tanto no inverno quanto no verão. 70% e 55% das flutuações térmicas diárias do interior da edificação foram reduzidas pela cobertura verde no inverno e no verão, respectivamente. Com estas avaliações a autora pôde demonstrar que a técnica possui grande potencial de aplicação no clima considerado, melhorando o conforto e a eficiência energética da edificação.

Machado, Britto e Neila (2003) determinaram a condutividade térmica equivalente em uma cobertura verde construída em Madrid, Espanha. Para tanto, formularam uma equação que estabeleceu a relação entre o balanço energético de uma cobertura verde sobre um meio natural e de uma cobertura verde sobre uma edificação. Foram monitoradas as radiações solares absorvida, refletida, transmitida, evapotranspirada e utilizada no processo de fotossíntese, o fluxo de calor convectivo dentro da cobertura verde e as transferências de calor por condução. Os autores puderam calcular os valores horários da condutibilidade térmica para um período de 24 horas e concluíram que é possível calcular a condutibilidade térmica da cobertura verde utilizando dados obtidos experimentalmente, e que os resultados obtidos serão de grande valia para realização de simulações mais precisas.

Niachou et al (2001) analisaram as propriedades térmicas e a performance energética de uma cobertura verde extensiva para estimar o impacto da cobertura verde no consumo energético de uma edificação em Atenas, na Grécia. Os autores fizeram a análise em duas fases. Primeiramente, medições experimentais internas e externas foram realizadas tanto em uma edificação com cobertura verde, quanto em uma edificação adjacente similar, sem cobertura verde, durante um período de 50 dias no verão e em seguida, um estudo das propriedades térmicas da cobertura verde, além do estudo de desempenho térmico utilizando simulação computacional. Após as análises, os autores concluíram que a temperatura superficial externa da cobertura verde variou de acordo com o tipo de vegetação, sendo as medições mais baixas conseguidas com espécies mais densas. Também observaram que as coberturas verdes retardam o ganho de calor em períodos quentes e mantém as temperaturas internas mais amenas que nas edificações sem a cobertura verde. Através da modelagem matemática, utilizando o software TRNSYS para calcular a massa e a transferência de calor para o interior das edificações, os autores concluíram que, para um edifício sem isolamento térmico algum o coeficiente de transferência de calor varia entre 6 (com cobertura verde) e 16 $\text{W/m}^2\text{K}$ (sem cobertura verde), se mantém estável (com e sem cobertura verde) em 0,2 $\text{W/m}^2\text{K}$ para edifícios com isolamento térmico moderado e se mantém em apenas 0,02 a 0,06 $\text{W/m}^2\text{K}$ para edifícios com bom isolamento térmico, sendo os coeficientes sempre mais baixos nos edifícios com cobertura verde, independente do tipo de isolamento. Por fim, os autores indicaram que a economia de energia total variou entre 37 a 48% para edifícios sem isolamento, 4 a 7% para edifícios com isolamento moderado e aproximadamente 2% para edifícios com bom isolamento.

Theodosiou (2003) desenvolveu uma versão modificada de um modelo analítico existente para que este pudesse ser acoplado às ferramentas de simulação disponíveis, visto que as ferramentas existentes não simulam técnicas de condicionamento passivo de maneira completa. A proposta oferecida pelo autor considerou os seguintes parâmetros: espessura do solo, densidade e altura da folhagem, tipo de cobertura verde, espessura das camadas inferiores e condições climáticas locais, e provou que esta associação produziu uma precisão aceitável nos resultados obtidos. O autor observou que o parâmetro mais importante é a densidade foliar. Este parâmetro afeta consideravelmente os efeitos de resfriamento que a cobertura verde promove, somados à altura da folhagem e tipo de cobertura verde, agem como técnica de resfriamento durante a maior parte do verão. Por fim o autor verificou que as condições climáticas possuem um papel importante no desempenho das coberturas verdes como técnica de resfriamento passivo, sendo a umidade relativa e velocidade do vento as mais importantes, pois, nos períodos com menor umidade relativa, ou quando a umidade é extraída pelo vento, os efeitos da evapotranspiração tem seu melhor desempenho no resfriamento da edificação.

Wong et al (2007) exploraram os benefícios térmicos e visuais de uma cobertura verde extensiva em Singapura. Medições de *antes* e *depois* foram feitas em dias típicos. As medições de *antes*, foram feitas com a cobertura vazia (antes da montagem) e as medições de *depois* ocorreram 8 meses depois, com as plantas já grandes. Foram medidas as temperaturas superficiais externas, temperatura do ar e umidade relativa em diferentes alturas, radiação global, velocidade e direção dos ventos e precipitação. Foi possível, para os autores, verificar uma diferença de até 18°C entre as temperaturas superficiais de *antes* e *depois*, entretanto, neste caso, os efeitos da vegetação não foram tão bons quanto o que se esperava, visto que as plantas selecionadas não tiveram uma cobertura tão boa e não mostraram resultados tão significativos para os autores quanto em uma cobertura do tipo intensiva. Ainda assim, os autores puderam tirar conclusões positivas, como: aproximadamente 60% do fluxo de calor foi impedido de adentrar a edificação após a instalação da cobertura verde e os índices de ofuscamento dos arredores, que eram causados pela laje nua, diminuíram após a montagem da cobertura verde.

Jim e Tsang (2011) examinaram as propriedades físicas, processos biológicos e desempenho térmico de isolamento de uma cobertura verde intensiva na cidade de Hong Kong, China, durante as quatro estações, durante dois anos. Sensores foram instalados em diferentes alturas e nas camadas da cobertura verde, para medir a temperatura do ar em

diferentes níveis e a temperatura do solo em diferentes profundidades, a temperatura superficial externa, a umidade do solo, a radiação solar, a velocidade do vento e a precipitação. O desempenho térmico excelente da cobertura verde intensiva pôde ser verificado em condições de calor. A espessura do substrato, neste caso, foi de 100 cm, entretanto, os autores verificaram que uma fina camada de apenas 10 cm já é suficiente para reduzir substancialmente a penetração de calor na edificação. Por fim, os autores observaram que em condições de inverno a grossa camada de substrato também manteve a edificação fresca, pois o fluxo de calor ascendente retira o calor do ambiente através da grossa camada de substrato que está mais frio, devido às temperaturas externas, e por consequência, foi necessário gasto energético com aquecimento.

Tsang e Jim (2011) tentaram estimar teoricamente os ganhos da cobertura verde extensiva em termos de desempenho térmico e economia de energia. Os autores empregaram modelos teóricos para estimar o desempenho térmico de telhados verdes em Hong Kong, China, e sugerem a técnica para trazer benefícios na refrigeração passiva e economia de energia. Os autores calcularam os benefícios de resfriamento das coberturas verdes, comparando-as com uma cobertura convencional, sem camada verde e indicaram que a disponibilidade de água de telhados verdes se relaciona positivamente com a taxa de evapotranspiração, pois a vegetação ajusta ativamente a taxa de evapotranspiração em condições de seca para reduzir a perda de água. Partindo do princípio que o substrato da cobertura verde pode absorver água e as plantas gerenciam a evapotranspiração, a combinação de dissipação de calor latente e convecção do ar aumentam a eficácia da dissipação do calor excessivo do solo. Em contraste com coberturas verdes, uma pequena fração do excesso de calor armazenado nos materiais de construção das coberturas sem camada verde só pode ser dissipada por convecção do ar. O calor sensível dos dois tipos de cobertura varia de acordo com a convecção. A quantidade de calor sensível segue a insolação e é dependente da magnitude do gradiente de temperatura entre o ar e a superfície do solo. A vegetação do telhado verde pode regular sua temperatura corporal para evitar danos físicos das células vegetais pelo processo de transpiração. O processo de evapotranspiração permite que uma grande quantidade de energia absorvida no solo possa ser lançada para o ambiente externo na forma de dissipação de calor latente. O fluxo de calor latente segue a duração dos raios solares. A radiação solar pode acelerar a taxa de evapotranspiração e aumentar a perda de calor latente. A mudança de estado da água pode extrair o calor solar absorvido, transmiti-lo ao ambiente externo e reduzir o armazenamento de calor no solo. Os autores ainda indicaram

que: os telhados verdes têm o componente ‘solo’ que faz o papel duplo e notável de absorção de água e calor. Pode-se abastecer de água a cobertura para conduzir a evapotranspiração e, portanto, expulsar o calor armazenado. Isto implica que a dissipação de calor latente pela cobertura verde é mais eficiente em áreas úmidas tropicais. Em contraste com telhados verdes, os convencionais não são projetados para armazenar água para a evaporação. Como resultado, a dissipação de calor latente das coberturas convencionais é insignificante. Partindo destas informações e resultados experimentais, os autores concluíram que caso as coberturas verdes possam ser instaladas em aproximadamente 1400 blocos residenciais populares em Hong Kong, estimados 43.9TJ de energia solar podem ser impedidos de penetrar nas edificações nas estações quentes, sem mencionar os benefícios ambientais.

Por fim, Parizotto e Lamberts (2011) investigaram a influência de uma cobertura verde extensiva no desempenho térmico de uma casa experimental monitorada termicamente na cidade de Florianópolis – SC, em comparação às telhas cerâmicas e metálicas. Os sensores instalados internamente monitoraram a temperatura do ar a 1,5m de altura, temperatura superficial do teto em um ponto e o fluxo de calor entre a superfície do teto e o ar interior. Os sensores alocados externamente monitoraram as temperaturas superficiais de paredes e coberturas, e, para a cobertura verde, sensores de temperatura adicionais foram alocados em cada camada componente da cobertura. As variáveis ambientais também foram obtidas através de uma estação meteorológica próxima ao local da pesquisa. As medições ocorreram durante uma semana sob condições de calor e uma semana sob condições de frio. Os autores puderam concluir que a cobertura verde reduziu consideravelmente o ganho de calor em períodos quentes (92% quando comparado com a cobertura cerâmica e 97% quando comparado com a cobertura metálica) e aumentou sua perda (49% quando comparado com a cobertura cerâmica e 20% comparando com a cobertura metálica). Além disso, ela continuou a reduzir os ganhos de calor (70% em relação à cobertura cerâmica e 84% em relação à cobertura metálica) e ainda diminuiu a perda de calor nos períodos frios (44% em relação à telha cerâmica e 52% em relação à telha metálica). A cobertura verde também apresentou a menor amplitude térmica em relação às temperaturas superficiais externas e menor amplitude térmica durante o período de calor, entretanto, amplitude similar à dos outros tipos de cobertura durante o período frio. Os autores ressaltaram que a geometria, posicionamento e sombreamento das coberturas são diferentes entre si. Por fim os autores concluíram que as coberturas verdes contribuem para o bom desempenho térmico da edificação em condições de

clima temperado, entretanto, os parâmetros de projeto devem ser pensados de modo a evitar um desempenho fraco durante o inverno.

Apesar de todos os estudos acima relacionados e diversos outros, ainda faltam informações quantitativas sobre o potencial de economia de energia para climatização dos ambientes quando se usa a cobertura verde, principalmente em se tratando da sua aplicação em edificações de médio e pequeno porte.

A cidade de São Paulo, com seus inúmeros problemas urbanos, pede por soluções urgentes. Como será visto a seguir, as coberturas verdes conseguem sanar grande parte deles. Este é um assunto relevante para a sociedade e para o meio ambiente; logo, um estudo detalhado do desempenho térmico dos telhados vegetados nesta latitude e para este tipo de clima pode trazer bons resultados que incentivem a aplicação destes em larga escala onde seus benefícios sejam necessários.

Neste contexto, propôs-se avaliar experimentalmente o potencial de economia de energia que a cobertura verde oferece para a climatização de edificações. Essa avaliação foi realizada baseada em resultados de medições em duas células de teste representadas por edificações semelhantes, executadas especialmente para a pesquisa e aqui denominadas “protótipos”: uma com telhado vegetado e uma com cobertura cerâmica. O procedimento utilizado será descrito nos capítulos *3. Procedimentos de Construção dos Protótipos* e *4. Procedimentos de Aquisição de Dados*.

1.2 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho dividiram-se em objetivos geral e específicos, a saber:

1.2.1 Geral

O objetivo da pesquisa foi verificar a possível contribuição da cobertura verde na economia de energia para a climatização de ambientes fechados, por meio da comparação do comportamento térmico de um sistema de cobertura verde com o sistema de cobertura

convencional de telhas cerâmicas aplicados a edificações em São Paulo, durante as diferentes estações do ano, no período de um ano. Partiu-se da hipótese que as coberturas verdes possuem melhor desempenho térmico que as telhas cerâmicas. Para se atingir os objetivos, foi realizada pesquisa experimental utilizando-se dois protótipos construídos especialmente para este fim.

1.2.2 Específicos

- Analisar os dados climáticos do período da pesquisa para definir os dias e os episódios climáticos representativos de cada estação do ano;
- Comparar o comportamento térmico do sistema de cobertura verde em relação ao de telha cerâmica ao longo das quatro estações;
- Analisar os dados coletados e quantificar a provável economia de energia do sistema de cobertura verde no processo de resfriamento e aquecimento do ambiente.

2. COBERTURAS VERDES

Este capítulo aborda a revisão bibliográfica específica sobre coberturas verdes, o conceito, as propriedades e os fatores condicionantes do objeto de estudo que, por sua vez, fornecem embasamento para esta dissertação.

2.1 HISTÓRIA DAS COBERTURAS VERDES

As coberturas verdes fazem parte da arquitetura vernacular há séculos como solução para regulação térmica das edificações. A maneira mais simples de definir as coberturas verdes é dizer que são telhados com plantas em cima, ou ainda, de acordo com Osmundson (1999), uma cobertura verde é qualquer espaço aberto, plantado, com o propósito de proporcionar satisfação ao homem e melhorias ambientais, e que seja separado do solo por uma edificação ou qualquer outra estrutura.

A história destes telhados remonta a épocas muito antigas, sendo os Jardins Suspensos da Babilônia uma das, senão a construção mais antiga que apresenta este sistema de cobertura, datada de aproximadamente 600 a.C.

Durante vários séculos a arquitetura espontânea construiu moradias com coberturas verdes; sendo assim, são encontrados exemplares datados de diversas épocas em culturas diferentes e por vezes, não correlacionadas. Por exemplo, em países frios como Escandinávia, Islândia e Rússia e em muito quentes como a Tanzânia, além de cidades como Pompéia e outras cidades importantes do Império Romano e, posteriormente, na Renascença italiana e francesa. Foram os vikings e normandos que levaram a técnica para o Canadá e Estados Unidos (PECK *et al*, 2009).

Na década de 1920, com a recém surgida arquitetura moderna, o arquiteto Le Corbusier introduziu o conceito de *Terraço Jardim* como um dos cinco pontos para a nova arquitetura. Este conceito transforma as coberturas em terraços habitáveis, usados para convivência e lazer, trazendo de volta o que as construções estavam consumindo, o espaço público (BENEVOLO, 2001; MACIEL, 2002). No Brasil o primeiro terraço jardim seguindo este conceito foi construído por Lúcio Costa em 1930, no prédio do Ministério da Educação e

Saúde, no Rio de Janeiro. Entretanto, após o declínio da arquitetura moderna este conceito ficou esquecido, ao menos no Brasil.

As coberturas verdes não tinham uma aplicação tão grande até tempos mais recentes. Então, nos países do norte da Europa, onde a escassez de terras para novas construções, combinadas com o desenvolvimento de novos materiais para construção de coberturas acabaram somando forças para as adaptações modernas das coberturas verdes. Quando Suíça, Alemanha, Áustria e outros países iniciaram a campanha de reconstrução após a Segunda Guerra Mundial, os construtores utilizaram coberturas verdes por razões práticas, ambientais e estéticas (SNODGRASS, 2006).

A partir da década de 1960, com o aumento da densidade urbana e diminuição das áreas verdes, a preocupação com o declínio da qualidade de vida nas cidades renovou o interesse em telhados vegetados como “solução verde” nos países do norte da Europa. Desde então novas técnicas têm se desenvolvido nestes países. Na Alemanha as coberturas verdes se expandiram rapidamente desde 1980 e há uma estimativa que existam ao menos 10 milhões de metros quadrados de telhados vegetados neste país (PECK *et al*, 2009).

Hoje, diversos países da Europa adotaram as coberturas verdes devido a seus benefícios, assim como Estados Unidos e Canadá. Existem vários programas municipais e leis federais de incentivo à incorporação das coberturas verdes nas novas edificações, além de organizações não-governamentais especializadas em divulgar e aplicar as coberturas verdes. Snodgrass (2006) explica que a Alemanha não só emergiu como líder no desenvolvimento de tecnologias e sistemas para as coberturas verdes modernas, como também em aprovar leis federais e legislações específicas para instalação de coberturas verdes em troca de incentivo econômico ao proprietário, como redução de impostos.

No Brasil, desde a década de 1990 a utilização das coberturas verdes está se expandindo lentamente. Os estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul são os mais notórios na aplicação destes sistemas, havendo inclusive, nas capitais destes estados, leis de incentivo à construção de coberturas vegetadas.

2.2 TIPOS DE COBERTURAS VERDES

Geralmente as coberturas verdes são classificadas de acordo com o uso, o tipo de vegetação e a espessura do substrato. De acordo com estes dados deve ser dimensionada a estrutura da cobertura. Entretanto, em caso da reforma de uma cobertura existente, o tipo de

cobertura verde deve ser escolhido de acordo com a carga que a cobertura existente suportar. As coberturas verdes podem ser de três tipos: Extensiva, Intensiva e Semi-Intensiva.

2.2.1 Cobertura Verde Extensiva

Figura 2.1 - Exemplo de Cobertura Verde Extensiva

Fonte: American Hydrotec Inc., 2011

A cobertura verde extensiva, ilustrada nas Figuras 2.1 e 2.2, não é feita para uso público essencialmente; não que isto não seja possível, mas este tipo de cobertura geralmente é construído para atenuar os efeitos das águas pluviais na rede pública. A cobertura verde extensiva utiliza espécies rústicas e rasteiras, como grama e forrações que não necessitam de cuidado e manutenção constantes, apenas em período de seca. Neste caso o substrato tem espessura que varia de 6 a 20 cm e pode ser executado em coberturas inclinadas até 45°, desde que haja uma malha estrutural para estabilizar o solo e impedi-lo de deslizar.

Figura 2.2 - Academia de Ciências da Califórnia, São Francisco

Fonte: American Hydrotec Inc., 2011

2.2.2 Cobertura Verde Semi-Intensiva

Figura 2.3 - Exemplo de Cobertura Verde Semi-Intensiva

Fonte: American Hydrotec Inc., 2011

É uma cobertura intermediária entre a intensiva e a extensiva, tanto na profundidade do substrato (12 a 25 cm) quanto na variedade de espécies (permite espécies do porte de arbustos médios) (Figura. 2.3). Requer manutenção periódica. A inclinação também é inversamente proporcional à espessura do substrato. Alguns autores nem consideram esta classificação, se atendo apenas aos tipos intensivo e extensivo.

2.2.3 Cobertura Verde Intensiva

Figura 2.4 - Exemplo de Cobertura Verde Intensiva

Fonte: American Hydrotec Inc., 2011

Este tipo de cobertura é caracterizado por ser a que mais se assemelha a um jardim e pode ser elaborada com espécies de grande porte, como árvores e arbustos (Figura 2.4). Na maioria das vezes são públicas e podem ser decoradas com mobiliário específico, como bancos e pérgulas. É o tipo que requer maior manutenção e cuidados, como poda e irrigação constantes. Devido à presença de espécies maiores, o substrato deste tipo de cobertura verde pode variar de 10 cm a 1,20m de espessura. As coberturas verdes intensivas não devem ser executadas em telhados inclinados, apenas em bases horizontais devido aos riscos de deslizamento, já que a espessura do substrato é maior. A Figura 2.5 ilustra

este tipo de cobertura.

Figura 2.5 - Millenium Park, Chicago
Fonte: American Hydrotec Inc., 2011

2.3 BENEFÍCIOS DAS COBERTURAS VERDES

Evidentemente, as coberturas verdes sozinhas não podem resolver todos os problemas decorrentes do desenvolvimento urbano; entretanto, proporcionam diversos benefícios que podem ser uma parte da solução, se aliadas a outras técnicas de construção sustentável. De acordo com Minke (2004) e IGRA (*International Green Roof Association*), os benefícios que as coberturas verdes apresentam são:

- ✓ Redução das superfícies pavimentadas e impermeáveis;
- ✓ Produção de oxigênio e dióxido de carbono;
- ✓ Redução dos níveis de poluição. Filtragem de partículas de poeira e fumaça e absorção de componentes da chuva ácida;
- ✓ Diminuição dos efeitos das ilhas de calor urbanas;
- ✓ Regulação térmica dos ambientes através da evapotranspiração das plantas;
- ✓ Redução das flutuações de umidade do entorno;
- ✓ Aumento da vida útil da cobertura devido à sua proteção contra fatores desgastantes (insolação e intempéries, entre outros);
- ✓ Diminuição dos níveis de ruídos externos no interior da edificação;
- ✓ Isolamento térmico da edificação. Economia de energia com condicionamento do ar;

- ✓ Proteção contra incêndio, devido ao retardamento do alastramento das chamas;
- ✓ Uso do espaço para recreação e lazer;
- ✓ Retenção da água das chuvas prevenindo inundações, visto que a água excedente que escoar da cobertura vai para a rede de coleta pluvial após o período crítico da chuva. A água armazenada pela cobertura verde volta para o ciclo natural da água por evaporação;
- ✓ Percepção de aromas agradáveis no entorno da cobertura verde, caso sejam utilizadas espécies aromáticas em sua composição, contrapondo o odor desagradável dos materiais expostos às intempéries;
- ✓ Habitat para insetos e pássaros;
- ✓ Melhoria da qualidade de vida e da saúde física e mental;
- ✓ Mescla da edificação à natureza.

2.4 COMPONENTES DO SISTEMA CONSTRUTIVO

O sistema construtivo é composto por alguns elementos chave que independem do tipo de cobertura verde escolhido. Esses elementos são os descritos a seguir.

2.4.1 Vegetação

As espécies vegetais selecionadas e tipos de cuidados necessários, além de dependerem do tipo de cobertura verde escolhida, dependem do clima e da localização geográfica da cobertura, já que nem todas as espécies sobrevivem aos diversos tipos de clima.

A cidade de São Paulo, onde foi feita esta pesquisa, possui clima tropical de altitude, caracterizado por estações bem definidas: verão quente e chuvoso e inverno frio e seco. O protótipo analisado foi coberto por cobertura verde do tipo extensivo. Se adequam a esta cobertura todas as espécies classificadas como forração, compatíveis com este tipo de clima.

De acordo com as características descritas por LORENZI e SOUZA (2001), algumas espécies podem ser empregadas satisfatoriamente em uma cobertura verde no Brasil, sendo elas:

- ✓ Rosinha-de-sol – *Aptenia cordifolia*
- ✓ Amendoim-rasteiro – *Arachis repens*
- ✓ Bulbine – *Bulbine frutescens*
- ✓ Dicondra – *Dichondra repens*
- ✓ Gota-de-orvalho – *Evolvulus pusillus*
- ✓ Grama azul - *Festuca glauca*
- ✓ Maria-sem-vergonha - *Impatiens walleriana*
- ✓ Cacto-margarida - *Lampranthus productus*
- ✓ Grama preta - *Ophiopogon japonicus*
- ✓ Grama batatais - *Paspalum notatum*
- ✓ Estrelinha-gorda - *Sedum multiceps*
- ✓ Margaridinha rasteira - *Spilanthes repens*
- ✓ Grama inglesa - *Stenotaphrum secundatum*
- ✓ Grama esmeralda - *Zoysia japonica*

Dependendo da espessura do substrato, nas coberturas do tipo semi-intensivo e intensivo, a seleção das espécies vegetais é quase ilimitada, podendo incluir diversas combinações de forrações, arbustos e árvores.

2.4.2 Substrato

O substrato é a base do telhado verde. A espessura adequada deve ser determinada de acordo com o tipo de cobertura, assim como os nutrientes e a aeração. Dependendo do tipo de cobertura verde uma grande variedade de substratos está disponível. As características principais dos substratos são: granulação, porcentagem de matéria orgânica, estabilidade estrutural, resistência à erosão pelo vento, permeabilidade, capacidade máxima de retenção de água, quantidade de nutrientes, aeração e pH. É importante que a presença de ervas daninhas seja mínima.

Juntamente com a camada de drenagem, o substrato facilita a drenagem adequada do excesso de águas pluviais. Materiais minerais leves como pedra-pomes, argila expandida, xisto expandido e lajotas de argila se provaram confiáveis em uso prolongado. Material

orgânico não tratado e solo superficial têm desvantagem em termos de peso e drenagem; eles devem ser usados apenas como complemento dos substratos minerais (*IGRA*).

2.4.3 Drenagem e Camada Filtro

As coberturas verdes absorvem a maior parte das águas pluviais e as devolvem para a atmosfera por transpiração. Dependendo da espessura do sistema e da intensidade da chuva, o excesso de água pode ser drenado para fora da cobertura e acumulado em local adequado, para reuso posterior. A capacidade de absorção de água da cobertura verde deve ser dimensionada de acordo com o índice de precipitações do local onde ela será construída. As descidas de água devem estar livres de resíduos de substratos e sob manutenção periódica.

A *IGRA* afirma que, por precaução, coberturas com camadas de drenagem embutidas devem possuir duas saídas de drenagem, ou uma saída de drenagem e um escape para o excesso de água. Faixas de cascalho, sarjetas e telas aumentam a velocidade da drenagem. Dependendo do modelo e do material da camada de drenagem ela pode ter funções adicionais, como armazenamento de água para uso em períodos sem chuva, aumento da área de raízes, espaço para aeração do sistema e proteção da estrutura. Wong (2006) explica que as camadas de drenagem com função de reservatório comumente são feitas de poliestireno e comportam até 32 litros por metro quadrado.

A camada filtro separa a camada do substrato e vegetação da camada de drenagem retendo as partículas menores, evitando o entupimento da camada de drenagem. De acordo com a *IGRA*, as camadas filtro são geralmente feitas de materiais geotêxteis e nos tipos extensivos também agem como veículo para transportar a água armazenada para as plantas por capilaridade (WONG, 2006).

2.4.4 Impermeabilização e Camada Anti-raiz

Se a própria manta impermeabilizante não for resistente às raízes, uma membrana extra, com esta função específica deve ser adicionada; esta é a função da membrana anti-raízes, proteger a impermeabilização da ação perfurante das raízes das plantas. Além disso, todas as juntas e cantos do telhado devem ter proteção contra a penetração das raízes. A FLL

(*The Landscaping and Landscape Development Research Society* - Alemanha) fez um teste denominado “Procedimentos para Investigação da Penetração de Raízes nas Coberturas Verdes” com diversas mantas impermeabilizantes e indica mais de 70 tipos que cumprem ambos os requisitos, impermeabilizar e barrar raízes (*IGRA*). Uma das mais largamente usadas é a membrana termoplástica de PVC. Vale também observar que a membrana anti-raiz não é impermeável; logo, não deve ser usada para substituir a manta impermeabilizante (WONG, 2006).

2.4.5 Estrutura

Pode ser de madeira, bambu, metal ou concreto armado, desde que esteja propriamente impermeabilizada e resista à carga do tipo de cobertura escolhido. Um ponto importante a ressaltar é que a carga deve ser calculada considerando o peso das plantas adultas com substrato saturado.

As instalações que façam parte do telhado devem ser agrupadas de modo a causar o mínimo de interferência possível e facilitar a sua manutenção. Para a manutenção tanto do sistema de cobertura quanto das instalações presentes no telhado, deve ser previsto um acesso.

Para telhados com inclinação superior a 20° algum tipo de dispositivo, tais como malhas ou mantas antiderrapantes, deve ser instalado para evitar deslizamentos do substrato (Minke, 2004).

Em lugares de muito vento deve-se certificar que as camadas de base estejam bem afixadas, para evitar o levantamento do sistema pelo vento (*IGRA*).

2.5 COBERTURAS VERDES ESPONTÂNEAS

Ocasionalmente as coberturas verdes ocorrem espontaneamente através da deposição de matéria orgânica e sementes no topo das coberturas que não recebem manutenção ou se encontram em áreas de grande arborização, conforme ilustram as Figuras 2.6 e 2.7. Não é recomendável, entretanto, que estas coberturas sejam mantidas, visto que a estrutura da edificação não foi projetada para suportar o sobrepeso nem impermeabilizada adequadamente.

A cobertura verde espontânea pode, deste modo, comprometer a estrutura do telhado onde cresceu, causando rachaduras e infiltrações na estrutura.

Figura 2.6 - Cobertura espontânea de gramíneas crescendo sobre telhado
Fonte: Acervo da autora

Figura 2.7 – Cobertura espontânea de cactos crescendo sobre telhado
Fonte: Acervo da autora

3. PROCEDIMENTOS DE CONSTRUÇÃO DOS PROTÓTIPOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa foram construídos dois protótipos, representativos de uma edificação residencial térrea, de mesmas dimensões e igualmente instrumentados, sob as mesmas variáveis ambientais. O primeiro protótipo, denominado P1, foi coberto com sistema de cobertura verde e o segundo protótipo, denominado P2, foi coberto com cobertura cerâmica do tipo telha romana.

O sítio onde foram construídos os protótipos é na Escola Politécnica da USP, na cidade de São Paulo. Conforme mostra a Figura 3.1, a cidade está localizada na região Sudeste do Brasil aos 23°32' 52" de latitude Sul e 46°38'09" de longitude Oeste, com altitude média de 802m acima do nível do mar, o que justifica as manhãs e noites frequentemente mais frescas (GOULART et al, 1998).

Figura 3.1 - Localização da cidade de São Paulo
Imagem livre de direitos autorais

O clima de São Paulo é tropical de altitude. Devido aos efeitos conjugados de altitude, latitude e frequência das massas polares as temperaturas médias anuais variam de 20 a 24°C, podendo atingir 18°C em áreas mais elevadas. Durante o verão esta amplitude gira em torno de 20 a 32°C e no inverno de 6 a 20°C. Os ventos frios predominantes vêm do sul e ocasionalmente sopram ventos do oeste. A média anual de precipitações é de

aproximadamente 1500 mm. O período seco ocorre de junho a agosto e o de chuvas de dezembro a março. A disponibilidade de luz natural no verão, ao meio-dia, é de aproximadamente 45 mil lux (TARIFA, J.R.; AZEVEDO, T.R., 2001).

3.1 OS PROTÓTIPOS

3.1.1 Diretrizes para a Construção

De acordo com a Norma 15220-3:2005 da ABNT, que fala sobre desempenho térmico de edificações, São Paulo encontra-se na Zona Bioclimática 3, conforme ilustram as Figuras 3.2, 3.3 e 3.4, extraídas da referida norma. A figura 3.4 é representativa da cidade de Florianópolis, que se encontra na mesma zona bioclimática de São Paulo.

Figura 3.2 – Zoneamento Bioclimático Brasileiro

Fonte: Norma 15220-3:2005 – ABNT

Figura 3.3 – Zona Bioclimática 3
 Fonte: Norma 15220-3:2005 – ABNT

Figura 3.4 – Carta Bioclimática apresentando as normais climatológicas de cidades desta zona, destacando a cidade de Florianópolis, SC (situada na mesma zona que a cidade de São Paulo).
 Fonte: Norma 15220-3:2005 – ABNT

Para cidades classificadas nesta zona a referida norma recomenda as diretrizes construtivas relacionadas nas Tabelas 3.1, 3.2 e 3.3 abaixo.

Tabela 3.1: Aberturas para ventilação e sombreamento das aberturas para a Zona Bioclimática 3

Aberturas para ventilação	Sombreamento das aberturas
Médias	Permitir sol durante o inverno

Tabela 3.2: Tipos de vedações externas para a Zona Bioclimática 3

Vedações externas
Parede: Leve refletora
Cobertura: Leve isolada

Tabela 3.3: Estratégias de condicionamento térmico passivo para a Zona Bioclimática 3

Estação	Estratégias de condicionamento térmico passivo
Verão	J) Ventilação cruzada
Inverno	B) Aquecimento solar da edificação C) Vedações internas pesadas (inércia térmica)
Nota: Os códigos J, B e C são os mesmos adotados na metodologia utilizada para definir o Zoneamento Bioclimático do Brasil (ver anexo B da mesma norma).	

As Tabelas 3.4 a 3.6 a seguir conceituam o que foi determinado anteriormente.

Tabela 3.4: Detalhamento das estratégias de condicionamento térmico

Estratégia	Detalhamento
B	A forma, a orientação e a implantação da edificação, além da correta orientação de superfícies envidraçadas, podem contribuir para otimizar o seu aquecimento no período frio através da incidência de radiação solar. A cor externa dos componentes também desempenha papel importante no aquecimento dos ambientes através do aproveitamento da radiação solar.
C	A adoção de paredes internas pesadas pode contribuir para manter o interior da edificação aquecido.
I e J	A ventilação cruzada é obtida através da circulação de ar pelos ambientes da edificação. Isto significa que se o ambiente tem janelas em apenas uma fachada, a porta deveria ser mantida aberta para permitir a ventilação cruzada. Também deve-se atentar para os ventos predominantes da região e para o entorno, pois o entorno pode alterar significativamente a direção dos ventos.

Tabela 3.5: Aberturas para ventilação

Aberturas para ventilação	A (em % da área de piso)
Pequenas	$10\% < A < 15\%$
Médias	$15\% < A < 25\%$
Grandes	$A > 40\%$

Tabela 3.6: Transmitância térmica, atraso térmico e fator de calor solar admissíveis para cada tipo de vedação

Vedações externas		U (Transmitância Térmica) [W/m ² .K]	ϕ (Atraso Térmico) [horas]	FS _o (Fator Solar) [%]
Paredes	Leve	$U \leq 3,00$	$\phi \leq 4,3$	$FS_o \leq 5,0$
	Leve refletora	$U \leq 3,60$	$\phi \leq 4,3$	$FS_o \leq 4,0$
	Pesada	$U \leq 2,20$	$\phi \geq 6,5$	$FS_o \leq 3,5$
Coberturas	Leve isolada	$U \leq 2,00$	$\phi \leq 3,3$	$FS_o \leq 6,5$
	Leve refletora	$U \leq 2,30.FT$	$\phi \leq 3,3$	$FS_o \leq 6,5$
	Pesada	$U \leq 2,00$	$\phi \geq 6,5$	$FS_o \leq 6,5$
<p>NOTAS</p> <p>1 Transmitância térmica, atraso térmico e fator solar</p> <p>2 As aberturas efetivas para ventilação são dadas em percentagem da área de piso em ambientes de longa permanência (cozinha, dormitório, sala de estar).</p> <p>3 No caso de coberturas (este termo deve ser entendido como o conjunto telhado mais ático mais forro), a transmitância térmica deve ser verificada para fluxo descendente.</p> <p>4 O termo “ático” refere-se à câmara de ar existente entre o telhado e o forro.</p>				

3.1.2 Projeto Padrão dos Protótipos

O projeto padrão para os protótipos foi feito seguindo alguns dados fornecidos pela Norma 15220-3:2005 da ABNT, que trata do desempenho térmico das edificações. A parte 3 desta norma fala especificamente do zoneamento bioclimático brasileiro e sobre as diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social.

Os protótipos foram construídos no Departamento de Engenharia e Construção Civil, na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, conforme ilustrado na Figura 3.5.

Figura 3.5 - Localização dos protótipos na POLI – USP, indicada pelo marcador A
 Fonte: Google Maps

A exemplo da pesquisa de LOPES (2007), os protótipos possuem características semelhantes em relação à orientação solar, aberturas, dimensões e composição dos elementos construtivos, variando apenas o sistema de cobertura. As construções têm dimensões internas de 2,20 x 2,70m e pé-direito de aproximadamente 2,60m. Todos os protótipos possuem piso cerâmico assentado sobre contrapiso de concreto e fundação de concreto tipo radier, com espessura de 15 cm.

A vedação das aberturas é feita com uma porta de alumínio modelo padrão, com dimensões 0,80 x 2,10m e uma janela de alumínio, duas folhas de correr, com dimensões 1,20 x 1,00m. A janela está voltada para o sudoeste e a porta para o noroeste. Os protótipos estão distantes três metros um do outro, a partir da fundação, para que a trajetória do sol aconteça de maneira que um não faça sombra sobre o outro. O único anteparo é uma torre que sombreia o sítio ocasionalmente por algumas horas por dia em alguns períodos do ano.

As paredes foram construídas de acordo com as especificações dadas pela Norma 15220-3:2005 da ABNT, relacionadas nas Tabelas 3.7 e 3.8 a seguir.

Tabela 3.7: Paredes

Parede	Descrição	U (Transmitância Térmica) [W/(m ² .K)]	CT (Capacidade Térmica) [kJ/(m ² .K)]	φ (Atraso Térmico) [horas]
Parede de tijolos de 6 furos circulares, assentados na menor dimensão Dimensões do tijolo: 10,0x15,0x20,0 cm Espessura da argamassa de assentamento: 1,0 cm Espessura da argamassa de emboço: 2,5 cm Espessura total da parede: 15,0cm	2,28	168	3,7

Tabela 3.8: Propriedades térmicas dos materiais utilizados

Material	ρ (Densidade de Massa Aparente) [kg/m ³]	λ (Condutividade Térmica) [W/(m.K)]	c (Calor Específico) [kJ/(kg.K)]
Cerâmica	1600	0,90	0,92
Argamassa de emboço ou assentamento	2000	1,15	1,00
Concreto	2400	1,75	1,00

O protótipo com cobertura verde foi denominado P1 e o protótipo com cobertura cerâmica P2. A cobertura de P1 foi apoiada em laje plana com vigas pré-moldadas de concreto com 12 cm de espessura e 3% de declividade e tem platibanda com 30 cm de altura. P2 tem a cobertura apoiada nas vigas superiores. Ambos têm beiral de 50 cm. A Figura 3.6, a seguir, representa o projeto esquemático.

Figura 3.6 - Projeto Esquemático dos Protótipos

A construção foi feita seguindo os padrões tradicionais, pois independente de o mundo estar vivendo um período onde se requer o máximo de soluções sustentáveis possíveis, quaisquer alterações feitas no sistema construtivo tradicional pode interferir na identificação

dos resultados, visto que ainda não se tem dados normatizados dos sistemas construtivos considerados alternativos.

Para analisar o desempenho de um elemento pouco conhecido, deve-se aplicá-lo dentro de um contexto tradicional para que se destaque.

De posse dos resultados obtidos com a aplicação da cobertura verde em uma construção edificada com sistema construtivo tradicional, há uma gama de possibilidades de se alterar outros elementos do sistema construtivo. Adicionando elementos pouco usuais, considerados alternativos, será possível identificar maior quantidade de ganhos em diversos outros aspectos ainda não mensurados.

3.1.3 Protótipo 1 – Cobertura Verde

A fundação, as paredes e a laje foram construídas conforme descrito no item 3.1.2

Como já foi dito, existem três tipos de coberturas verdes, as intensivas, as semi-intensivas e as extensivas. As primeiras possuem substrato mais espesso e espécies mais variadas, que necessitam de manutenção constante. As segundas possuem uma espessura intermediária de substrato e espécies que necessitem de manutenção esporádica e as últimas possuem espessura mais fina de substrato e espécies rústicas que não necessitam de manutenção freqüente, é uma cobertura quase auto-suficiente.

As coberturas verdes extensivas são mais fáceis de serem estudadas porque sua vegetação não requer manutenção constante, o que não maquia os resultados medidos. Para evitar variações nas medições, a espécie vegetal selecionada para cobrir o protótipo P1 foi a Grama amendoim (*Arachis repens*), visto que a mesma é perene, possui geometria favorável à drenagem e circulação de ar e efeito decorativo notável.

O protótipo P1 foi coberto com cobertura verde do tipo extensivo organizada da seguinte maneira: laje impermeabilizada, membrana anti-raiz, camada de drenagem, camada filtro, substrato e vegetação, conforme ilustra a Figura 3.7 abaixo.

Camadas funcionais de uma cobertura verde extensiva típica:
 1. Impermeabilização; 2. Camada Drenante; 3. Camada Filtro; 4. Barreira Anti-raízes; 5. Substrato e 6. Vegetação.

Figura 3.7 – Esquema da cobertura de P1.
 Fonte: Green Roof Service LLC

3.1.4 A Cobertura Verde

Conforme explicado anteriormente, a cobertura verde foi montada seguindo a descrição demonstrada pela Figura 3.7. Após o período de cura da laje foi feita uma regularização contra falhas, com argamassa fina, para que a manta impermeabilizante pudesse ser aplicada corretamente.

A impermeabilização foi feita utilizando manta asfáltica *Lwarflex*, da empresa Lwart Química, aplicada por mão-de-obra especializada, fornecida pela própria empresa. Foi feito o teste de estanqueidade para verificação de eventuais falhas de aplicação (Figura 3.13).

Após a correta secagem da manta, foi feito um chapisco de argamassa fina, com função de proteção mecânica da impermeabilização e base para aplicação de produto herbicida. A aplicação de produto herbicida com função de proteção anti-raízes se deu satisfatoriamente, e após estas etapas estarem concluídas foi possível montar a cobertura verde.

Sobre a camada herbicida foi adicionada uma camada de manta de feltro, com a função de proteção mecânica. Sobre esta camada foi aplicada uma camada de argila expandida com função drenante (Figura 3.16). Sobre a argila expandida foi aplicada uma segunda camada de manta de feltro, desta vez com função de filtragem e retenção das partículas do substrato (Figura 3.17).

Sobre a camada filtro foi aplicada a camada de substrato, composta de terra vegetal, e por fim foi feito o plantio da espécie vegetal selecionada (Figura 3.18). Após o segundo mês ocorreu um replantio das mudas, visto que o solapamento da terra vegetal estava impedindo o desenvolvimento da espécie. Nesta ocasião a terra vegetal foi misturada com húmus de minhoca.

Para cobrir a área da laje, que possui aproximadamente 14m², foram utilizadas 224 mudas, com densidade de aproximadamente 25 mudas/m², espaçadas em uma malha de 23x22 cm.

A grama-amendoim (*Arachis repens*), também conhecida como amendoim-rasteiro ou amendoinzinho é uma espécie angiosperma da família *Leguminosae-Papilionoide* (LORENZI e SOUZA, 2001). Esta espécie foi selecionada por sua geometria favorável ao desempenho térmico, permitindo rápida drenagem e circulação de ar entre seus ramos, além de sua notável função ornamental.

De acordo com os resultados obtidos por DEL BARRIO (1998), para a redução eficiente dos fluxos de calor para o interior da edificação, no verão, devem-se utilizar plantas com muitas folhas, preferencialmente horizontais e utilizar solo leve e aerado, como turfa, para aumentar o atraso térmico.

Esta sugestão é suprida pela aplicação da grama-amendoim, visto que sua geometria foliar e suas necessidades fisiológicas são semelhantes ao descrito pela autora, informação que é corroborada pela descrição da espécie feita por LORENZI e SOUZA (2001).

Os autores descrevem a espécie como herbácea reptante, perene, nativa do Brasil, atingindo de 10 a 20 cm de altura, com ramagem prostrada, fina, de nós e entre nós destacados. Folhas compostas, curtas, com dois pares de folíolos pequenos, em formação compacta. Também descrevem seu cultivo ideal como sendo em canteiros a pleno sol, ricos em matéria orgânica, permeáveis e com irrigação periódica.

Por ser uma planta nativa do Brasil e América Latina (HOLBROOK & STALKER, 2002), portanto, habituada com as variações climáticas do continente, esta espécie tem desenvolvimento rápido, não requer manutenção constante com podas e custo baixíssimo, sendo financeiramente viável para o consumidor de baixa renda (a autora desta pesquisa adquiriu as espécies utilizadas na elaboração da cobertura verde desta pesquisa na CEAGESP, em dezembro de 2010. Uma caixa com 15 mudas era comercializada a R\$4,00 na época – R\$0,375 por muda).

Ao longo do desenvolvimento da cobertura foi observado, na fase de crescimento da espécie, o aparecimento de muitas ervas daninhas, o que significa que a grama-amendoim, quando jovem, ainda não tendo “fechado” a área a ela destinada, requer manutenção para que seu crescimento não seja afetado pela presença de espécies indesejadas que podem inibir seu pleno desenvolvimento. Quando a grama-amendoim atinge o porte adulto, sua geometria foliar horizontal sombreia o substrato, inibindo o aparecimento de espécies indesejadas.

A espécie é leve, apesar da aparência compacta, o que é favorável para a estrutura, que não recebe sobrecarga. A espécie também é relativamente resistente, tendo suportado sem alterações visíveis períodos de frio, calor e chuva intensa, não tendo, entretanto, reagido muito bem a períodos mais secos. Isto significa que durante a estação de seca o usuário deverá ficar atento para rega diária ou freqüente.

Ao longo do tempo foi observada a presença de diversas espécies de insetos, tais como aranhas, besouros, mosquitos, borboletas e cigarras. Também foram encontrados outros pequenos animais como joaninhas, caracóis, mini-lesmas e pássaros.

Tomadas os devidos cuidados durante o plantio (proporcionando um ambiente úmido e rico em matéria orgânica), é uma espécie de fácil manutenção e desenvolvimento, com custo baixo, e valor ornamental notável, além disso, é facilmente aceita pela fauna local, o que pode ser considerado um ponto positivo para a aplicação da espécie.

A grama-amendoim pode ser usada satisfatoriamente como única espécie em uma cobertura verde, devido às suas características geométricas e fisiológicas e devido ao fato de ser uma espécie nativa de nosso continente, já adaptada às variações climáticas e conhecida pela grande maioria dos amantes de plantas.

3.1.5 Protótipo 2 – Cobertura Cerâmica

A fundação, as paredes e a cobertura foram construídas conforme descrito no item 3.1.2. As telhas cerâmicas aplicadas são das mais comuns utilizadas no país, do tipo romana.

É sabido que o PVC possui baixa condutividade térmica, logo, pode funcionar como material isolante. De acordo com Lamberts et al (2010), as propriedades térmicas das coberturas cerâmicas com forro de PVC, utilizado neste projeto por ser um componente usual em habitações populares, são demonstradas na Figura 3.8 a seguir.

Figura 3.8 – Propriedades térmicas da cobertura de telha cerâmica com forro de PVC
Fonte: Lamberts et al (2010)

3.1.6 Memorial Fotográfico da Obra

A sequência de fotos a seguir, da Figura 3.9 à 3.22 estão na ordem cronológica da execução dos protótipos.

Figura 3.9 - Gabarito para fundação

Figura 3.10 - Fundação tipo radier

Figura 3.11 - Formação das paredes

Figura 3.12 - Pilares estruturais

Figura 3.13 - Cura da laje e construção da platibanda

Figura 3.14 - Teste de estanqueidade da impermeabilização

Figura 3.15 - Montagem do telhado cerâmico

Figura 3.16 - Aplicação de herbicida sobre laje impermeabilizada

Figura 3.17 - Camada de proteção mecânica e camada drenante com argila expandida

Figura 3.18 - Camada filtro e primeira camada de substrato

Figura 3.19 - Grama amendoim

Figura 3.20 - Grama amendoim após 3 meses e após adição de húmus

Figura 3.21 – Grama amendoim após 10 meses do plantio

Figura 3.22 – Grama amendoim após 13 meses do plantio

4. PROCEDIMENTOS PARA AQUISIÇÃO DE DADOS

4.1 SISTEMAS DE MEDIÇÃO E AQUISIÇÃO DE DADOS

Para realizar as medições foram utilizados sensores específicos e feitas medições de variáveis internas e externas de P1 e P2.

4.1.1 Medição das Variáveis Internas e Externas

Por se tratar de um experimento para medir as condições reais que serão enfrentadas pelo usuário quando este aplicar o sistema de cobertura, as variáveis relativas às condições de conforto também foram consideradas. As medições foram feitas simultaneamente para garantir que os dados coletados possam ser comparados entre uma casa e outra em um mesmo instante. As variáveis medidas no interior dos protótipos foram:

- Temperaturas superficiais de piso, parede e teto (°C);
- Temperaturas internas e externas do ar (temperatura de bulbo seco, °C);
- Temperatura do ponto de orvalho do ar interior (°C);
- Umidade do ar (interna e externa, %).

Em cada protótipo, as medições constantes das temperaturas superficiais foram feitas com sensores fixos (termopares) em 30 pontos, sendo cinco em cada parede, cinco no piso e cinco no teto, homogeneamente distribuídos e numerados. Para medir continuamente a temperatura do ponto de orvalho do ar interior, foi fixado no centro do teto um sensor específico. Também, um sensor de temperatura e um de umidade do ar interno foram alocados no ponto médio do volume de cada protótipo para medirem estas grandezas. Além desses, foi instalado um conjunto de sensores de temperatura e umidade do ar externamente aos protótipos para medir as respectivas variáveis referentes ao ar externo durante todo o período de testes.

As medições constantes se deram com portas e janelas fechadas nos dois protótipos, para que se mantivessem sempre as mesmas condições durante todo o período de medições, ou seja, tentou-se manter pelo maior período de tempo a condição térmica mais estável, o mais próximo possível do regime permanente, o que deu maior credibilidade para os dados coletados. As renovações de ar se deram principalmente por infiltração, o que significa que a velocidade do ar é muito baixa e não tem interferência significativa no comportamento térmico do ambiente fechado. Por esta razão optou-se por não medir internamente a velocidade do ar.

A exemplo de LEITE (2003), atendendo às especificações da norma ISO 7726 (1998) que estabelece os critérios para a caracterização de ambientes homogêneos, foram adotadas as alturas de 0,60 m (nível do tronco), 1,10 m (nível da cabeça de uma pessoa sentada), e 2,00 m (utilizadas para a análise do perfil de estratificação da temperatura do ar) para as alocações dos termopares.

O posicionamento dos sensores no interior dos protótipos está indicado a seguir, através das Figuras 4.1 a 4.5 (apesar de o desenho esquemático ser indicativo de cobertura verde, ambos os protótipos possuem a mesma distribuição de sensores).

Figura 4.1 - Planta de Locação de Instrumentos

Figura 4.2 - Locação de Instrumentos - Parede 1

Figura 4.3 - Locação de Instrumentos – Parede 2

PAREDE 3
sem escala

Figura 4.4 - Locação de Instrumentos – Parede 3

PAREDE 4
sem escala

Figura 4.5 - Locação de Instrumentos – Parede 4

Adicionalmente, o IAG emite, sob demanda, dados climatológicos para serem utilizados com fim exclusivo de pesquisa. A pedido da aluna Iara Lima Ferraz, os seguintes dados foram disponibilizados pelo Instituto para utilização nesta pesquisa: pluviosidade, temperaturas do ar e de bulbo úmido e umidade relativa. A escolha do IAG se deu pelo fato de que este Instituto possui mais de seis décadas de trabalhos realizados apenas após a incorporação à Universidade de São Paulo, desconsiderando os anos anteriores. Isto o caracteriza como instituição idônea e séria, cujos dados emitidos são confiáveis. Estes dados foram utilizados para definir as datas analisadas nesta pesquisa. A análise diária, após selecionadas as datas ocorreu, no entanto, utilizando dados coletados *in loco*.

4.1.2 Descrição da Instrumentação

As características e quantidades dos sensores são relacionadas na Tabela 4.1. Os sensores foram selecionados procurando atender às exigências sugeridas pela norma ISO 7726 (1998). É importante ressaltar que os equipamentos utilizados nesta pesquisa foram adquiridos com o suporte da FAPESP, através de Projetos de Auxílio Regulares à Pesquisa – Processos N° 2010/09149-9 e 2006/59334-1, ambos sob a responsabilidade da Prof^a Dr^a Brenda Chaves Coelho Leite.

Tabela 4.1: Especificação dos Sensores

Sensores	Tipo	Faixa de medição	Incerteza de medição	Quantidade (total para P1 e P2)
Temperatura de bulbo seco (ar interno e externo)	Termo-resistor com barreira radiante	0 a 90 °C	0,1 °C	13 (12 internos e 1 externo)
Umidade Relativa do ar (interno e externo)	Capacitivo	5 a 98 %	2 %	3 (2 internos e 1 externo)
Temperatura de ponto de orvalho do ar interno	Termo-resistor	0 a 90 °C	0,1 °C	2
Temperaturas superficiais internas	Termopares J (Fe.Co)	5 a 50°C	± 0,5°C	60

4.1.3 Período de Coleta de Dados

A instalação e o *startup* dos sensores se deram até o dia 23 de fevereiro de 2011. O período de 23 de fevereiro de 2011 até 20 de abril de 2011 foi considerado período de medições preliminares, pois os equipamentos de coleta permanente ainda estavam sob ajustes.

De 21 de abril de 2011 até 31 de janeiro de 2012 foi definido como período de medições definitivas.

O período de coleta de dados cobre as quatro estações do ano, com aquisição de dados ininterrupta no período. As medições foram contínuas para que fosse possível analisar as condições atmosféricas ao longo das quatro estações e assim, poder analisar o comportamento térmico dos sistemas de coberturas selecionados sob diferentes condições.

4.2 TABULAÇÃO DOS DADOS COLETADOS

Na sequência será possível compreender como os dados coletados foram medidos, arquivados, tratados e analisados, por meio dos itens 4.2.1 e 4.2.2.

4.2.1 Hierarquia da Automação de Coleta de Dados

Como já descrito no item 3.3.1, os dados de temperatura superficial interna, temperatura e umidade do ar internas e externas e temperatura do ponto de orvalho do ar interior foram coletados continuamente durante o período das medições definitivas referido anteriormente.

A aquisição de dados ocorre da seguinte maneira: os termopares (medição de temperatura superficial) e RHTs (transmissores de temperatura e umidade) fixados nos pontos determinados em cada protótipo (Figuras 4.6 e 4.7) coletam as informações das variáveis correspondentes e enviam os resultados das medições para nove dispositivos de armazenagem tipo *Fieldlogger* (Figura 4.8). Os *Fieldloggers* são localizados em prateleiras específicas em cada protótipo (Figuras 4.10, 4.11 e 4.12) e ligados em série entre si.

Os dados medidos em P2 são transmitidos para P1 via cabo e descarregados através de conexão USB por um conversor i485 (Figura 4.9) alocado em P1. Os dados passam então a ser armazenados na memória do software específico para este fim (*Superview SCADA – Supervisory Control and Data Acquisition* – Figuras 4.13 e 4.14), estando então, disponíveis para consulta. A hierarquia descrita está demonstrada no Organograma 4.1.

Organograma 4.1: Hierarquia dos Sensores Permanentes em P1 e P2

Figura 4.6 – Termopar

Figura 4.7 - Fieldlogger

Figura 4.8 – RHT interno e externo

Figura 4.9 – Conversor USB i485

Figura 4.10 – Painei fechado

Figura 4.11 – Painei de P1 aberto

Figura 4.12 – Painei de P2 aberto

Figura 4.13 – Tela de abertura do Software Superview

Figura 4.14 – Tela de monitoração em tempo real do Software Superview

4.2.2 Tratamento e Análise dos Dados

O tratamento e a análise de dados foram feitos da seguinte maneira: após selecionados os “dias representativos” e os “episódios climáticos representativos” para cada estação do ano, definidos conforme descrito no item 4.3 a seguir, foi feita a análise de desempenho térmico

para as datas selecionadas em cada protótipo. Após esta etapa foi feito o estudo do comportamento diário, hora a hora, para cada mês de cada estação.

Por fim, os três tipos de análise somados demonstraram o comportamento térmico da edificação com cobertura verde e da edificação com cobertura de telha cerâmica.

Conforme explicado no Capítulo 2, item 2.3, as coberturas verdes promovem o isolamento térmico da edificação, mantendo as condições interiores mais amenas que as exteriores em condições de frio e de calor.

Com estes conceitos em mente, supôs-se, então, que estas condições térmicas ocorreriam em P1, ou seja, nele seriam mantidas as condições de conforto interiores adequadas, ou próximo de adequadas, tanto em situações de verão quanto inverno.

É sabido que as telhas cerâmicas tradicionais são porosas, portanto, permeáveis. BUENO (1994) demonstrou experimentalmente que as telhas porosas absorvem umidade do ar no período noturno, ficando com maior temperatura, e perdem esta umidade no período diurno, ficando com menor temperatura diurna sem flutuações consideráveis, ou seja, possuem baixa amplitude térmica. O autor ainda identificou, através de simulação, que o equilíbrio térmico das telhas porosas se dá pela presença de umidade nas mesmas.

Ciente destas condições supôs-se que o desempenho térmico da cobertura com telha cerâmica apresentasse funcionamento semelhante ao da cobertura verde, ao menos nos períodos mais úmidos do ano e isto foi comprovado através dos resultados das medições. Além disso, foi possível identificar em quais períodos do ano o desempenho de P1 é melhor que de P2 e vice-versa.

4.3 SELEÇÃO DOS DIAS ANALISADOS

De acordo com Akutsu (1998), o primeiro passo para a caracterização das condições climáticas do local em análise é a escolha do posto meteorológico que será usado como fonte de informação e a definição dos períodos de verão e inverno através das temperaturas máximas e mínimas dos meses mais quentes e mais frios, respectivamente. Seguindo estas recomendações, os dados climáticos utilizados são os fornecidos pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo - IAG/ USP, que define os

meses de calor como sendo os de primavera e verão (setembro a fevereiro) e os de frio como sendo os de outono e inverno (março a agosto).

4.3.1 Determinação do Dia Representativo da Estação do Ano

O dia representativo da estação é um dia com características de temperatura do ar que se manteve dentro das médias. Para definir os dias representativos de inverno e verão foi feita a seguinte análise:

1. Foram criadas três planilhas, contendo as médias diárias das temperaturas máximas do ar, as médias diárias de temperatura do ar e as médias diárias das temperaturas mínimas do ar para cada dia dos meses de abril de 2011 a janeiro de 2012, meses de análise desta pesquisa. Todos os dados utilizados para esta análise foram extraídos do boletim mensal do IAG.
2. Em seguida foram adicionadas à planilha de médias das temperaturas máximas a média de temperatura máxima mensal para cada mês analisado; à planilha de média de temperatura foram adicionadas a média de temperatura mensal para cada mês analisado e à planilha de média das temperaturas mínimas foram adicionadas as médias das temperaturas mínimas de cada mês.
3. Conforme sugerido por Akutsu (1998), foi encontrado um intervalo de precisão requerida para a análise dos dias, que neste caso foram calculados para as médias das máximas, médias e médias das mínimas mensais, seguindo as condições dadas:

$$TBS_{\max} = TV \pm z \text{ (verão)}$$

$$TBS_{\min} = TI \pm z \text{ (inverno)}$$

Onde, $TBS_{\max}$ = Temperatura de bulbo seco máxima

$TBS_{\min}$ = Temperatura de bulbo seco mínima

TV = temperaturas de verão

TI = temperaturas de inverno

$z = 0,5^{\circ}\text{C}$ (o valor de z define um intervalo em torno dos valores de

$TBS_{\max}$ e $TBS_{\min}$ correspondente à precisão requerida para a análise)

Ainda foi considerada a condição:

$TBS_{med} = TM \pm z$, onde TBS_{med} é o valor da temperatura de bulbo seco média e TM é o valor das temperaturas médias

4. Após definido o intervalo de precisão para médias das máximas, médias e médias das mínimas, os dias cujas temperaturas se encaixassem dentro dos valores de intervalo obtidos foram destacados.
5. Os dias não destacados foram desprezados e cada dia destacado foi analisado individualmente com o objetivo de verificar se possuía as três temperaturas que se encaixassem dentro dos intervalos de médias das máximas, médias e médias das mínimas.
6. Por fim, os dias que possuíam as três temperaturas dentro do intervalo de precisão foram analisados para que fossem escolhidos dois dias, um para representar o verão e outro o inverno. Não foi encontrado nenhum dia de primavera e nenhum outono que tivesse todas as medidas que se encaixassem dentro dos intervalos de precisão.

Após a análise, quatro dias cumpriram os requisitos: 25.07.2011, 11.08.2011, 19.01.2012 e 20.01.2012. As características dos dias pré-selecionados estão na Tabela 4.2 a seguir.

Tabela 4.2: Dias Representativos da Estação – pré-seleção

Dia	Média das máximas (°C)	Média diária (°C)	Média das mínimas (°C)	Amplitude diária (°C)	Média das umidades (%)
25.07.2011	22.3	16.3	12.2	10.1	74.9
11.08.2011	23.1	16.3	12.4	10.7	83.8
19.01.2012	27.0	20.6	17.2	9.8	85.6
20.01.2012	26.4	21.5	17.5	8.9	83.0

Foram analisadas as temperaturas médias, amplitude diária e média da umidade para os dias pré-selecionados.

Como os dados de análise foram fornecidos pelo IAG, uma comparação com os dados coletados nos protótipos foi feita. Para os dias de inverno não houve variação entre os dados fornecidos pelo IAG e os dados coletados no local, então, a seleção foi feita analisando as condições de temperatura e amplitude térmica oferecidas. O dia 25.07.2011 foi o dia que

apresentou temperaturas menores nas três médias analisadas e menor amplitude térmica, sendo, por este critério selecionado como dia representativo de inverno.

Para análises de verão também foi feita a comparação com os dados coletados nos protótipos e os dados fornecidos pelo IAG. Para o dia 19.01.2012 não houve variação entre os dados fornecidos pelo IAG e os dados coletados no local. Para o dia 20.01.2012 os valores de temperaturas do ar medidos no protótipo foram mais altas e a umidade relativa mais baixa que os dados fornecidos pelo IAG. A temperatura máxima local foi de 30,7°C e a fornecida pelo IAG foi de 26,4°C; já a umidade fornecida variou de 63 a 96% enquanto a umidade registrada no local dos protótipos variou de 43,2 a 79,5%. Devido aos dados de temperatura e umidade terem sido ainda mais extremos no local medido que os dados fornecidos, o dia 20.01.2012 foi selecionado para ser o dia representativo de verão, até mesmo porque nesse dia a média diária é superior à do dia 19.01.2012 e a amplitude térmica é menor. Novamente vale ressaltar que não foi encontrado nenhum dia de primavera nem de outono que tivesse todas as medidas que se encaixassem dentro do intervalo de precisão requerido para análise.

4.3.2 Determinação dos Episódios Climáticos Representativos

Definiu-se que os episódios climáticos representativos de cada estação são os dias com índices extremamente inferiores ou superiores às condições médias climatológicas do período, ou qualquer dia onde seja detectada atividade climatológica que possa ser considerada excepcional.

Para definir estes episódios climáticos foram feitas análises dos boletins climatológicos trimestrais e análises mensais emitidos pelo Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da USP (IAG-USP) a cada estação. Para cada boletim observaram-se as condições de temperatura, amplitude térmica, precipitação e umidade relativa.

Os dias analisados, para cada estação, foram os seguintes:

- Dia mais quente: dia que registrou a temperatura do ar mais alta do período entre todas as registradas;
- Dia mais frio: dia que registrou a temperatura do ar mais baixa do período entre todas as registradas. Os dias mais frios de cada estação foram sempre precedentes aos dias de maior amplitude térmica da estação;

- Dia com maior amplitude térmica: dia que registrou a maior variação entre a temperatura máxima e a temperatura mínima do ar para o período;
- Dia com menor amplitude térmica: dia que registrou a menor variação entre a temperatura máxima e a temperatura mínima do ar para o período;
- Dia mais chuvoso: dia que registrou a maior quantidade de chuva em mm para o período;
- Dia com menor umidade relativa: dia que registrou o menor valor de umidade relativa do ar para o período.

As estações do ano foram definidas de acordo com a convenção do IAG, que determina outono como os meses de março, abril e maio; inverno como os meses de junho, julho e agosto; primavera como os meses de setembro, outubro e novembro e por fim, o verão, como os meses de dezembro, janeiro e fevereiro de cada ano.

O primeiro boletim a ser analisado foi o referente aos meses de março, abril e maio de 2011, meses de outono, visto que as medições se iniciaram em abril de 2011 (IAG, 2011a). Para estes meses foram identificados os seguintes episódios representativos.

- Dia mais quente do outono: 14 de abril de 2011, com temperatura máxima de 31,5°C;
- Dia mais frio do outono: 29 de maio de 2011, com temperatura mínima de 6,4°C;
- Dia com maior amplitude térmica do outono: 05 de maio de 2011, com amplitude de 14,9°C;
- Dia com menor amplitude térmica do outono: 20 de março de 2011, com amplitude de 3,1°C;
- Dia mais chuvoso do outono: 12 de abril de 2011, com 27,5mm de acumulação;
- Dia com menor umidade relativa do outono: 30 de abril de 2011, 35% de umidade relativa.

Na sequência foi analisado o boletim referente aos meses de junho, julho e agosto de 2011, meses de inverno (IAG, 2011b). Para estes meses foram identificados os seguintes episódios representativos.

- Dia mais quente do inverno: 29 de agosto de 2011, com temperatura máxima de 32,5°C;

- Dia mais frio do inverno: 28 de junho de 2011, com temperatura mínima de 2,4°C e ocorrência de geada em alguns pontos;
- Dia com maior amplitude térmica do inverno: 06 de agosto de 2011, com amplitude de 18,7°C;
- Dia com menor amplitude térmica do inverno: 21 de agosto de 2011, com amplitude de 2°C;
- Dia mais chuvoso do inverno: 31 de agosto de 2011, com 34,8mm de acumulação;
- Dia com menor umidade relativa do inverno: 16 de agosto de 2011, 20% de umidade relativa.

Os meses de setembro, outubro e novembro de 2011 representam os meses do boletim de primavera (IAG, 2011c). Para estes meses foram identificados os seguintes episódios representativos.

- Dia mais quente da primavera: 01 de outubro de 2011, com temperatura máxima de 34,7°C;
- Dia mais frio da primavera: 01 de setembro de 2011, com temperatura mínima de 7,5°C;
- Dia com maior amplitude térmica da primavera: 03 de setembro de 2011, com amplitude de 22,2°C;
- Dia com menor amplitude térmica da primavera: 16 de outubro de 2011, com amplitude de 2,9°C;
- Dia mais chuvoso da primavera: 15 de novembro de 2011, com 50,8mm de acumulação;
- Dia com menor umidade relativa da primavera: 05 de setembro de 2011, 17% de umidade relativa.

Os episódios representativos de verão foram selecionados analisando os relatórios mensais emitidos pelo IAG, visto que as análises levaram em consideração os dados até 31 de janeiro de 2012. Foram analisados os meses de dezembro de 2011 e janeiro de 2012.

- Dia mais quente do verão: 23 de dezembro de 2011, com temperatura máxima de 33,2°C;
- Dia mais frio do verão: 11 de dezembro de 2011, com temperatura mínima de 12,8°C;

- Dia com maior amplitude térmica do verão: 12 de dezembro de 2011, com amplitude de 17,2°C;
- Dia com menor amplitude térmica do verão: 10 de janeiro de 2012, com amplitude de 2,2°C;
- Dia mais chuvoso do verão: 31 de dezembro de 2011, com 62,5mm de acumulação;
- Dia com menor umidade relativa do verão: 21 de dezembro de 2011, 31% de umidade relativa.

Para as análises dos resultados, nos casos em que as coletas de dados nos protótipos não ocorreram por alguma razão, foram adotados os valores dos dias que apresentaram dados, conforme listados abaixo.

- Na ausência de dados do dia mais quente do outono, utilizaram-se os dados do primeiro dia mais quente registrado após o início das medições (em 18 de abril de 2011), o dia 22 de abril, com temperatura de 30,8°C;
- Na ausência de dados do dia mais frio do outono, utilizaram-se os dados do segundo dia mais frio, dia 04 de maio de 2011, com temperatura de 12,1°C;
- Na ausência do dia com menor amplitude térmica do outono, utilizaram-se os dados registrados após o início das medições (em 18 de abril de 2011), o dia 26 de abril de 2011, com amplitude de 4,2°C;
- Na ausência de dados do dia mais chuvoso do outono, utilizaram-se os dados do segundo dia mais chuvoso, dia 28 de abril, com 18,3mm de chuva;
- Na ausência de dados do dia mais frio do inverno, utilizaram-se os dados do segundo dia mais frio, dia 05 de agosto de 2011, com temperatura de 3,5°C;
- Na ausência de dados do dia com menor umidade relativa do verão, e 2º e 3º dias com dados incompletos, o que não forneceria uma análise confiável, utilizaram-se os dados do segundo dia mais frio, dia 04 de janeiro de 2012, com umidade de 31%.

Os dias selecionados para análise nesta pesquisa e suas principais características podem ser verificados na tabela 4.3 a seguir.

Tabela 4.3: Dias Analisados nesta Pesquisa

Condição	Outono		Inverno		Primavera		Verão	
	Data	Dado	Data	Dado	Data	Dado	Data	Dado
Dia mais quente	22/04/11	T _{max} : 30,8 °C	29/08/ 11	T _{max} : 32,5 °C	01/10/11	T _{max} : 34,7 °C	23/12/11	T _{max} : 33,2 °C
Dia mais frio	04/05/11	T _{min} : 12,1 °C	05/08/ 11	T _{min} : 3,5°C	01/09/11	T _{min} : 7,5°C	11/12/11	T _{min} : 12,8 °C
Maior amplitude térmica*	05/05/11	14,9 °C	06/08/ 11	18,7 °C	03/09/11	22,2 °C	12/12/11	17,2 °C
Menor amplitude térmica*	26/04/11	4,2°C	21/08/ 11	2°C	16/10/11	2,9°C	10/01/12	2,2°C
Dia mais chuvoso	28/04/11	18,3 mm	31/08/ 11	34,8 mm	15/11/11	50,8 mm	31/12/11	62,5 mm
Menor umidade relativa	30/04/11	35%	16/08/ 11	20%	05/09/11	17%	04/01/12	31%
Dia representativo da estação	não há		25/07/11		não há		20/01/12	
As estações foram definidas pelos meses: Outono - março, abril e maio ; Inverno - junho, julho e agosto; Primavera - setembro, outubro e novembro e Verão - dezembro, janeiro e fevereiro. Os dados analisados foram de abril de 2011 a janeiro de 2012								
* A amplitude térmica foi calculada tomando-se a diferença entre as temperaturas máxima e mínima registradas no dia								

É importante ressaltar que os dados do IAG foram utilizados exclusivamente para a determinação dos dias a serem analisados, e que todos os dados utilizados nas análises do capítulo *Análise dos Resultados* foram os coletados nos próprios protótipos.

5. ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1 ANÁLISE DOS RESULTADOS NOS DIAS SELECIONADOS

Theodosiou (2003) explica que em um ambiente úmido a evapotranspiração é minimizada e a função mais importante da vegetação de uma cobertura verde passa a ser a proteção das camadas inferiores através de sombreamento e elevada inércia térmica. Como acontece com qualquer outra técnica que se beneficia da evaporação, coberturas verdes não têm tanto a oferecer em um ambiente úmido em comparação a um que seja mais árido. Este cenário também comprova a contribuição da evapotranspiração na capacidade da cobertura verde em agir como técnica de condicionamento passivo (extraíndo o calor de si), mais do que protegendo contra o superaquecimento.

O autor ainda explica que as condições climáticas provaram ter um importante papel no desempenho das coberturas verdes como técnica de condicionamento passivo. Foi demonstrado que a umidade relativa é o fator climático mais importante. Isto não é verdade apenas para coberturas verdes, mas para todas as técnicas relacionadas à evaporação. Um ambiente seco aumenta a função da evapotranspiração e a capacidade de resfriamento. O fluxo de calor máximo acontece momentos após os níveis de umidade atingirem o seu mínimo. Isto pode ser observado na Figura 5.1, a seguir.

Figura 5.1 – Fluxo térmico através da cobertura verde para diferentes níveis de umidade – Efeito da umidade relativa no fluxo térmico (legendas traduzidas pela autora da dissertação)

Fonte: Theodosiou (2003)

Como comprovado pelo autor, as condições climáticas tem um importante papel no desempenho térmico das coberturas verdes e de qualquer dispositivo de condicionamento passivo.

Ciente destas condições, a análise do comportamento de P1 e P2 durante os dias e episódios representativos da estação se faz importante para que as variações influenciadas pelo clima sejam observadas. As análises dos dias representativos da estação servem para observar o comportamento de P1 e P2 em condições padrão ao longo do ano.

A seguir será feita a análise de cada condição apresentada nos itens 4.3.1 e 4.3.2 e listados na Tabela 4.3, além de outras condições específicas que foram observadas. O estudo de desempenho se deu com base na análise dos dados coletados cujos resultados estão representados pelos gráficos listados a seguir:

- ✓ Termopares de piso em P1 e P2;
- ✓ Termopares a 0,60m de altura em P1 e P2;
- ✓ Termopares a 1,10m de altura em P1 e P2;
- ✓ Termopares a 2,00m de altura em P1 e P2;
- ✓ Termopares de teto em P1 e P2;
- ✓ Temperatura do ar;
- ✓ Umidade relativa do ar;
- ✓ Temperatura de ponto de orvalho;
- ✓ Comportamento da parede 1 em relação ao teto em P1 e P2;
- ✓ Comportamento da parede 2 em relação ao teto em P1 e P2;
- ✓ Comportamento da parede 3 em relação ao teto em P1 e P2 e
- ✓ Comportamento da parede 4 em relação ao teto em P1 e P2.

5.1.1 Análise das temperaturas superficiais de piso, parede e teto

As temperaturas superficiais de teto em P1 apresentaram comportamento com menores variações ao longo do dia que as de P2. Em P1 a amplitude não passou dos 4°C, isso no dia com maior amplitude térmica; em outras ocasiões as variações permaneceram entre 2 e 3°C. A temperatura superficial do teto mínima em P1 também se manteve mais alta que a temperatura superficial mínima em P2, por volta de 2 a 3°C. Em P2 ocorreram muitas oscilações na temperatura superficial de teto devido às características do próprio sistema de

cobertura, principalmente durante os dias mais quentes e com maior amplitude térmica. O comportamento em P2 que mais se assemelhou a P1 foi no dia de menor amplitude térmica.

As temperaturas registradas pelos termopares de teto em P1 no dia representativo de verão também demonstraram comportamento conforme observado nas análises dos dias representativos. As temperaturas variaram apenas 1°C ao longo de todo o dia. No inverno estas variações foram de 2°C e as temperaturas superficiais foram menores que no verão, mas mesmo assim, maiores que a temperatura do ar e de ponto de orvalho.

Em P2, no dia representativo de verão, as temperaturas de teto acompanharam a curva externa de temperatura do ar, e a temperatura permaneceu mais quente que o exterior após a hora mais quente do dia. No dia representativo de inverno, a situação foi similar, entretanto a temperatura superficial estava mais alta que a externa por todo o dia, ao contrário de P1. As temperaturas superficiais mais quentes foram no verão e não no inverno. As características das temperaturas de teto em P1 e P2 podem ser observadas nos Gráficos 5.1 a 5.2.

Gráfico 5.1 – Temperatura superficial de teto em P1 e P2 no dia representativo de verão

Gráfico 5.2 – Temperatura superficial de teto em P1 e P2 no dia representativo de inverno

As temperaturas registradas pelos termopares de teto, no dia mais quente da estação, em P1 se mantiveram com pouca variação ao longo do dia e as temperaturas em P2 apresentaram comportamento acompanhando a curva da temperatura externa, exceto no verão, quando as temperaturas atingiram até 8°C a mais que a temperatura externa em ambos. No Gráfico 5.3, que representa a temperatura superficial de teto no dia mais quente da primavera, pode-se observar o que foi dito.

Gráfico 5.3 – Temperatura superficial de teto em P1 e P2 no dia mais quente da primavera

No dia mais frio da estação os termopares de teto registraram um comportamento de temperatura com pouca variação ao longo do dia em P1. P1 apresentou valores de temperatura de teto com amplitude baixíssima nestes dias de frio, 2 a 3°C apenas, já P2 apresentou curvas que acompanharam as curvas de temperatura externa. É visível a diferença entre as curvas de P1 e P2 quando sobrepostas, assim como ocorreu durante os dias mais quentes de cada estação, entretanto, no inverno as temperaturas superficiais de teto nos dois protótipos se mantiveram baixas, e nos dias mais quentes, as temperaturas de P2 atingiram temperaturas bem maiores que P1. Estas observações estão demonstradas através do Gráfico 5.4.

Gráfico 5.4 – Temperatura superficial de teto em P1 e P2 no dia mais frio do inverno

Conforme dito anteriormente, nos dias com maior amplitude térmica, os termopares de teto em P1 apresentaram valores de temperatura que mantiveram os 2 a 3°C de variação mesmo com a grande amplitude térmica externa, ao contrário de P2, cujos valores acompanharam as oscilações externas, mostrando uma amplitude de até 14°C, conforme pode ser verificado no Gráfico 5.5, a seguir.

Gráfico 5.5 – Temperatura superficial de teto em P1 e P2 no dia com maior amplitude térmica da primavera

As condições de temperatura superficial de teto nos dias com menor amplitude térmica mostram que P1 manteve seu comportamento padrão, ou seja, amplitude em torno de 2 a 3°C. Neste caso, como as condições externas variaram muito pouco, o comportamento de P2 foi parecido com o de P1, a amplitude diária não passou de 3°C e a temperatura se manteve mais alta que a do ar exterior, o que vale ressaltar, neste caso, é que as temperaturas de P1 se mantiveram mais altas que em P2 em condições de inverno, o que mostra o potencial de isolamento térmico da cobertura verde (Gráfico 5.6).

Gráfico 5.6 – Temperatura superficial de teto em P1 e P2 no dia com menor amplitude térmica do inverno

No dia com menor umidade relativa da estação, as condições observadas anteriormente se repetiram. P1 manteve sua estabilidade em relação às temperaturas superficiais de teto, enquanto as temperaturas superficiais de teto de P2 acompanharam as variações externas, com leve atraso (Gráfico 5.7).

Como pôde ser observado, as condições em P1 e P2 ao longo de todas as estações, nos dias analisados, se repetiram, o que permite concluir que este é um comportamento padrão dos protótipos, diretamente influenciado pelos sistemas de cobertura aplicados.

Gráfico 5.7 – Temperatura superficial de teto em P1 e P2 no dia com menor umidade relativa da primavera

As **temperaturas superficiais de parede** em P1, para o dia representativo de verão apresentaram amplitude similar ao longo do dia, sofrendo apenas pequenas variações provavelmente de acordo com a insolação.

Em P1 a parede 2, que recebe maior incidência solar, mostrou maior variação de comportamento das temperaturas superficiais que a parede 3, que é a que se mantém sombreada por todo o dia, mas mesmo assim, a variação de temperatura não foi muito grande. No dia representativo de inverno o comportamento foi similar ao do verão, entretanto, com temperaturas registradas mais baixas, conforme pode ser percebido nos Gráficos 5.8 a 5.15, a seguir..

Gráfico 5.8 – Comportamento da parede 1 em P1 no dia representativo de verão

Gráfico 5.9 – Comportamento da parede 2 em P1 no dia representativo de verão

Gráfico 5.10 – Comportamento da parede 3 em P1 no dia representativo de verão

Gráfico 5.11 – Comportamento da parede 4 em P1 no dia representativo de verão

Gráfico 5.12 – Comportamento da parede 1 em P1 no dia representativo de inverno

Gráfico 5.13 – Comportamento da parede 2 em P1 no dia representativo de inverno

Gráfico 5.14 – Comportamento da parede 3 em P1 no dia representativo de inverno

Gráfico 5.15 – Comportamento da parede 4 em P1 no dia representativo de inverno

Em P2 as temperaturas superficiais de parede para o dia representativo de verão acompanharam a curva de temperatura externa e apresentaram as mesmas características das curvas em P1, porém, com uma amplitude aproximadamente 2°C maior. No dia representativo de inverno o comportamento é semelhante, entretanto as temperaturas registradas foram menores que as de verão mas se mantiveram aproximadamente 2°C mais altas que P1 sob as mesmas condições (Gráficos de 5.16 a 5.23).

Gráfico 5.16 – Comportamento da parede 1 em P2 no dia representativo de verão

Gráfico 5.17 – Comportamento da parede 2 em P2 no dia representativo de verão

Gráfico 5.18 – Comportamento da parede 3 em P2 no dia representativo de verão

Gráfico 5.19 – Comportamento da parede 4 em P2 no dia representativo de verão

Gráfico 5.20 – Comportamento da parede 1 em P2 no dia representativo de inverno

Gráfico 5.21 – Comportamento da parede 2 em P2 no dia representativo de inverno

Gráfico 5.22 – Comportamento da parede 3 em P2 no dia representativo de inverno

Gráfico 5.23 – Comportamento da parede 4 em P2 no dia representativo de inverno

Nos dias mais quentes da estação as temperaturas superficiais de parede se mantiveram com diferenças constantes entre si, acompanhando a curva de temperatura externa, sendo que as temperaturas superficiais em P1 apresentaram de 3 a 5 °C a menos que as temperaturas para as mesmas condições em P2. As condições indicadas podem ser observadas nos Gráficos A.1 a A.4 do Anexo 1.

As temperaturas superficiais de parede no dia mais frio da estação acompanharam os picos da curva de temperatura externa. As maiores diferenças de temperatura para mais ocorreram em termopares alocados em locais com maior incidência solar ou nas portas metálicas dos protótipos. Além disso, foi possível observar que os picos de temperatura em P2 foram levemente mais altos que em P1 em alguns momentos. Estas condições podem ser observadas nos Gráficos A.5 a A.8 do Anexo 1.

Para o dia com maior amplitude térmica da estação as temperaturas superficiais de parede apresentaram alta amplitude térmica, em resposta às condições externas, e após a hora mais quente do dia, tanto em P1 quanto em P2, em todas as estações pôde-se observar que a temperatura interna se manteve mais alta que a externa até o final do dia, mesma condição observada individualmente na análise das temperaturas superficiais de parede. Ainda assim, as temperaturas em P1 não atingiram valores tão altos quanto em P2. Isto pode ser constatado pela observação dos Gráficos A.9 a A.12 do Anexo 1.

No dia com menor amplitude térmica as temperaturas medidas pelos termopares de parede foram parecidas em P1 (todos os termômetros de cada altura registraram valores parecidos) e oscilaram um pouco mais em P2 (os termômetros com alturas mais baixas variaram mais seus registros de temperatura). Os valores registrados foram mais baixas em P1. Isto pode ser observado nos Gráficos A.13 a A.16 do Anexo 1.

Os termopares de parede, no dia com menor umidade relativa da estação, indicaram um comportamento da temperatura superficial similar aos que já foram analisados até o momento. As curvas acompanharam as curvas externas, sendo que P1 possui menor amplitude e suas temperaturas mínimas são mais altas que as de P2. A temperatura máxima atingida em P1 se manteve até 4°C mais baixa que a de P2 (Gráficos A.17 a A.20 do Anexo 1)

Nas paredes de P1 e P2 que receberam maior insolação houve maior amplitude térmica entre os valores medidos, e nas paredes que ficam na sombra houve menor amplitude térmica. O comportamento foi parecido em todas as estações e é possível verificar as temperaturas internas de cada parede acompanhando a curva de temperatura externa em cada estação.

O comportamento de todas as paredes de P1 e P2 foi homogêneo, e é possível verificar as temperaturas internas de cada parede acompanhando a curva de temperatura externa em cada estação. Ainda assim, apenas por esta análise, não é possível determinar a influência do teto no comportamento térmico das paredes. Para uma conclusão correta sobre os fluxos de calor nas paredes deverá tomar-se cabo de outras ferramentas, tal como um estudo termográfico, para complementar as análises. Os gráficos de comportamento das paredes foram elaborados analisando a relação entre os termopares das paredes e os termopares de piso e teto mais próximos à parede analisada.

As **temperaturas superficiais de piso** apresentaram pouca variação de temperatura em P1 e em P2, mantendo-se sempre acima da temperatura do ar e com pouca amplitude. Desta forma, é possível supor que a temperatura do piso é mais influenciada pela geotermia que pela cobertura; entretanto, ainda assim é possível observar variações de temperatura entre P1 e P2. As temperaturas de piso em P1 são geralmente mais altas 2 a 3°C que em P2. A umidade não teve tanta influência nas temperaturas superficiais de piso, visto que estas

temperaturas mantiveram seu comportamento dentro do esperado mesmo nos dias com menor umidade relativa.

Pudemos observar que as temperaturas de piso em P1 se mantiveram praticamente constantes, tanto no verão (amplitude de 2°C) quanto no inverno (amplitude de 1°C). Já em P2 as temperaturas de piso durante o verão tiveram o mesmo comportamento de P1, e no inverno possuiu maior amplitude, entretanto, temperaturas superficiais mais baixas que em P1, conforme podemos observar nos Gráficos 5.24 e 5.25.

Gráfico 5.24 – Temperatura superficial de piso em P1 e P2 no dia representativo de verão

Gráfico 5.25 – Temperatura superficial de piso em P1 e P2 no dia representativo de inverno

Assim como observado nos dias representativos de verão e inverno, no dia mais quente da estação, os termopares de piso registraram as temperaturas mais estáveis entre todas as temperaturas registradas nas duas edificações, sendo que P1 apresentou temperaturas mais altas que P2 alguns graus.

No dia mais frio da estação, as temperaturas registradas pelos termopares de piso se mantiveram com pouca variação ao longo do dia tanto em P1 quanto em P2. P1 apresentou valores de temperatura de piso 2 a 3°C mais altos que P2. Ainda assim, quando comparados com os dados do dia mais quente, as temperaturas superficiais de piso foram inferiores em até 4°C, ou seja, por mais que o piso promova algum isolamento térmico, ainda é influenciado diretamente pelas variações climáticas externas.

As medidas realizadas pelos termopares de piso do dia com maior amplitude térmica da estação apresentaram comportamento similar entre si, mas apresentando maior amplitude térmica (de até 5°C tanto em P1 quanto em P2) se comparado com os outros dias analisados.

As temperaturas de piso para os dias com menor amplitude térmica da estação, tanto em P1 quanto em P2 se mantiveram estáveis, com variação de 1 a 2°C apenas, ao longo do

dia, porém P1 manteve as temperaturas mais altas que em P2, como já pôde ser observado em outros dias com condições climáticas diferentes.

As temperaturas de piso para o dia mais chuvoso da estação se apresentaram similares ao que já foi observado anteriormente nos dias de menor amplitude térmica e no dia mais frio da estação.

Por fim, no dia com menor umidade relativa da estação, os termopares de piso de P1 apresentaram comportamento conforme as análises anteriores, as curvas se mantiveram mais estáveis e alguns graus acima das temperaturas registradas em P2, e a diferença entre as temperaturas das duas edificações se manteve constante.

Visto que as temperaturas superficiais de piso apresentaram comportamento semelhante em todos os episódios observados, em todas as estações, a compreensão deste comportamento se dá satisfatoriamente através dos Gráficos 5.24 e 5.25, apresentados anteriormente.

5.1.2 Análise da temperatura e umidade do ar interior

As temperaturas e umidades do ar interno nos dois protótipos são influenciadas pelas variações externas. O grande diferencial entre P1 e P2 é que esta oscilação ocorre com menor agressividade em P1 que em P2. Esta menor oscilação dos valores de temperatura e umidade em P1 mantém o ambiente com características de temperatura mais homogêneas e ajuda a melhorar seu desempenho. Estas observações estão demonstradas a seguir, pelos gráficos 5.26 e 5.27.

Gráfico 5.26 – Temperatura e Umidade relativa do ar em P1 e P2 no dia representativo de verão

Gráfico 5.27 – Temperatura e Umidade relativa do ar em P1 e P2 no dia representativo de inverno

O comportamento térmico dos dias mais quentes de cada estação foi caracterizado por curvas acentuadas de temperatura externa com queda nos percentuais de umidade relativa durante as horas mais quentes, exceto pelo dia mais quente de verão, quando a umidade se manteve alta durante o dia todo, estas características podem ser visualizadas nos Gráficos A.21 e A.22 constantes do Anexo 1.

Os dias mais frios de cada estação apresentaram características semelhantes quanto ao comportamento, acompanhando as variações externas, e isto pode ser verificado através do Gráfico A.23, criado para análise destes dias, constantes do Anexo 1 desta dissertação.

No dia com maior amplitude térmica de cada estação, a temperatura e a umidade do ar interno oscilaram assim como as condições externas; entretanto conseguiram manter as condições internas mais amenas que as externas nos horários de temperatura mais alta, P1 tendo desempenho ainda melhor que P2, como pode ser visto no Gráfico A.24, constante do Anexo 1.

No dia com menor amplitude térmica, a baixa amplitude térmica foi proporcionada por um dia com umidade relativa alta e constante em todas as estações, e temperaturas predominantemente baixas mesmo na primavera e no verão, informação que pode ser verificada no Gráfico A.25, constante do Anexo 1.

As características dos dias mais chuvosos de cada estação se assemelharam à dos dias com menor amplitude térmica, excetuando-se o dia de verão, que teve o comportamento similar ao do dia com maior amplitude térmica, provavelmente devido às altas temperaturas da época. É sabido que a presença de umidade no ar é responsável por sua estabilidade térmica, logo, a semelhança dos comportamentos entre os dias mais chuvosos e os de menor amplitude térmica pode ser devido à alta umidade registrada no período.

As características dos dias com menor umidade relativa são as parecidas entre si, pois em todos os casos os valores de umidade muito baixos provocaram picos de temperatura, o que é uma consequência normal, visto que é a presença de umidade do ar que regula a amplitude térmica. É sabido que quanto mais saturado o ar menor a variação térmica, neste caso, todos os quatro dias analisados apresentaram temperaturas altas, próximas ou superiores a 30°C, e que subiram e caíram rapidamente; naturalmente os valores de umidade relativa nestes momentos foram os mais baixos, conforme pôde ser verificado no Gráfico A.26, constante do Anexo 1.

5.1.3 Análise da temperatura de ponto de orvalho

Uma das preocupações com as coberturas verdes é a respeito da condensação, pelo fato da possibilidade da laje estar a uma temperatura mais baixa do que a do ponto de orvalho do ar interno. Foi observado que em P1 a temperatura do ponto de orvalho é sempre de 5 a 7°C menor que a temperatura superficial de teto. Em momento algum a temperatura do ponto de orvalho em P1 foi observada mais alta que as temperaturas do teto. A curva de ponto de orvalho mostra baixa amplitude em todos os casos analisados.

Já em P2, a temperatura do ponto de orvalho, na maior parte do tempo também se manteve abaixo dos valores de temperatura superficial do teto, mas, a diferença entre estas temperaturas caiu para 2 a 3°C, metade da diferença de temperatura encontrada em P1. A curva do ponto de orvalho em P2 também sofreu quase as mesmas oscilações que as temperaturas superficiais de teto. As diferenças entre P1 e P2 foram observadas ao longo dos gráficos de temperatura superficial de teto anteriores, e abaixo nos Gráficos 5.28 e 5.29 para os dias representativos de verão e inverno.

Gráfico 5.28 – Temperaturas do ar internas e externas e ponto de orvalho no dia representativo de verão

Gráfico 5.29 – Temperaturas do ar internas e externas e ponto de orvalho no dia representativo de inverno

Tanto no dia representativo de verão quanto no de inverno, e em outros dias observados nesta pesquisa, a temperatura do ponto de orvalho de P2 fica superior à temperatura do ar interno e das temperaturas superficiais de teto em alguns momentos do dia, isto significa que poderia ocorrer condensação no teto do protótipo, apesar disso, não foi encontrado vestígio de condensação em P2 nos momentos em que se visitou a edificação.

Já em P1 a temperatura do ponto de orvalho nunca ultrapassa a temperatura do ar interno nem as temperaturas superficiais de teto e tampouco foi observado vestígio de condensação nos momentos em que se visitou P1. Isto significa que a cobertura verde pode ser empregada satisfatoriamente para o clima de São Paulo mesmo em uma edificação sem condicionamento artificial pois não há o risco de condensação. A questão que levantou preocupação em P1, curiosamente não ocorreu em P1, e sim em P2

5.2 COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DE P1 E P2 COM OS CRITÉRIOS DA NBR 15575 NOS DIAS REPRESENTATIVOS DE VERÃO E INVERNO

A Norma NBR 15575-1:2008 da ABNT, que trata dos requisitos gerais para o desempenho de edifícios de até cinco pavimentos, apresenta os critérios de avaliação de desempenho térmico para condições de verão e inverno. O anexo E desta norma apresenta as tabelas com valores mínimos, intermediários e superiores para desempenho. A Tabela 5.1 mostra os critérios para condições de verão e a Tabela 5.2 mostra os critérios para condições de inverno

Tabela 5.1: Critério de Avaliação de Desempenho Térmico para Condições de Verão

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas 1 a 7	Zona 8
<i>M</i>	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$	$T_{i,max} \leq T_{e,max}$
<i>I</i>	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^{\circ} \text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 1^{\circ} \text{C})$
<i>S</i>	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 4^{\circ} \text{C})$	$T_{i,max} \leq (T_{e,max} - 2^{\circ} \text{C})$ e $T_{i,min} \leq (T_{e,min} + 1^{\circ} \text{C})$
$T_{i,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius; $T_{e,max}$ é o valor máximo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius; $T_{i,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius; $T_{e,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius; NOTA Zonas bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3.		

Tabela 5.2: Critério de Avaliação de Desempenho Térmico para Condições de Inverno

Nível de desempenho	Critério	
	Zonas bioclimáticas 1 a 5 ¹⁾	Zonas bioclimáticas 6, 7 e 8
M	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 3^{\circ} \text{ C})$	Nestas zonas, este critério não precisa ser verificado
I	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 5^{\circ} \text{ C})$	
S	$T_{i,min} \geq (T_{e,min} + 7^{\circ} \text{ C})$	
$T_{i,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar no interior da edificação, em graus Celsius;		
$T_{e,min}$ é o valor mínimo diário da temperatura do ar exterior à edificação, em graus Celsius;		
NOTA Zonas bioclimáticas de acordo com a ABNT NBR 15220-3.		

Visto que os protótipos foram feitos seguindo as diretrizes de construções populares e são edificações de geometria e acabamento simples, serão utilizados os critérios mínimos especificados pela NBR 15575-1:2008 para a comparação. Em condições de verão, conforme especifica a Tabela 5.1, para edificações localizadas nas zonas de 1 a 7 (os protótipos se

encontram na Zona bioclimática 3, conforme descrito no item 3.1.1) em um nível mínimo de desempenho, a temperatura interna máxima da edificação deve ser menor ou igual à temperatura externa máxima, em graus Celsius.

Já para as condições de inverno, conforme especifica a Tabela 5.2, para edificações localizadas nas Zonas bioclimáticas de 1 a 5, em um nível mínimo de desempenho, a temperatura interna mínima da edificação deve ser maior ou igual a temperatura externa mínima, somados 3°C.

Tendo estes conceitos em mente é possível observar se o desempenho das edificações P1 e P2 nos dias representativos de verão e inverno, sem condicionamento artificial, respondem aos critérios de avaliação de desempenho térmico descritos acima. Para isso, foram criados gráficos de temperatura do ar para os dias representativos de verão e inverno, e analisados para observar se os protótipos cumpriam os critérios exigidos na norma, sem a interferência de dispositivos de condicionamento artificial.

Como pode ser observado no Gráfico 5.30, que indica a temperatura do ar no dia 20.01.2012, dia representativo de verão, as temperaturas internas em algumas horas do dia são menores que a temperatura externa durante as horas mais quentes do dia. Assim também ocorre durante o inverno, quando as temperaturas internas são maiores que a temperatura externa nas horas mais frias do dia, como pode ser verificado no Gráfico 5.31 do dia representativo de inverno.

Gráfico 5.30 – Temperaturas do ar, internas e externas, no dia representativo de verão

Gráfico 5.31 – Temperaturas do ar, internas e externas, no dia representativo de inverno

Analisando as edificações sem fontes internas geradoras de calor e considerando as temperaturas máximas do ar externo no período de 8:00h às 13:00h, para o período de verão, apenas P2 indica precisar de condicionamento artificial para resfriamento das 11:00h às 15:00h, mesmo que das 11:00h às 13:00h a temperatura do ar interno tenha se apresentado mais baixa do que a do ar externo, mas ainda assim, acima do limite para conforto indicado pela NBR 16401/2008, conforme a Tabela 5.3.

Tabela 5.3 – Limites para conforto de acordo com a NBR 6401/08

Limites para conforto - NBR 6401/08		
Verão	UR 35%	23 a 26°C
	UR 65%	22,5 a 25,5°C
Inverno	UR 30%	21,5 a 24%
	UR 60%	21 a 23,5%

Quanto a P1, de acordo com a mesma análise, não necessita de condicionamento artificial em nenhum momento. Para o inverno, considerando as temperaturas do ar externo mínimas no período de 00:00h às 9:00h, em ambos os protótipos as temperaturas do ar interno são superiores em mais de 3°C a temperatura do ar externo, o que satisfaz aos critérios da NBR 15575-1/2008. Entretanto, seus valores se apresentaram abaixo do limite mínimo de temperatura do ar para conforto, de acordo com a NBR 16401/2008, implicando, com isso, que em ambos os casos o aquecimento é requerido na maior parte do dia. É importante ressaltar que, em se considerando o calor interno gerado pela ocupação, o cenário pode ser bem diferente.

5.3 COMPORTAMENTO MENSAL DA TEMPERATURA DO AR DE P1 E P2 NO PERÍODO ANALISADO

Utilizando os dados coletados de maio de 2011 a janeiro de 2012 (o mês de abril de 2011 foi desprezado nesta análise por ter dados disponíveis apenas dos dias 21 a 30) foi possível analisar o comportamento da temperatura do ar de P1 e P2. A seguir serão apresentados os Gráficos 5.32, 5.33 e 5.34, de temperatura externa, temperatura interna em P1 e temperatura interna em P2, para os meses considerados. Os dados considerados para a elaboração dos gráficos foram coletados nos protótipos, por isso podem divergir um pouco dos dados fornecidos pelo IAG.

Gráfico 5.32 – Temperaturas do ar exterior – Comportamento mensal
(variação de 5 a 39°C)

Gráfico 5.33 – Temperaturas do ar – Comportamento mensal em P1
(variação de 12 a 33°C)

Gráfico 5.34 – Temperaturas do ar – Comportamento mensal em P2
(variação de 9 a 37°C)

O que pode ser observado no comportamento mensal das temperaturas internas de P1, P2 e das temperaturas externas é que, evidentemente por influência das flutuações diárias de umidade, as curvas mensais com maiores picos são as de temperatura externa, em todos os meses do ano. A variação de temperaturas externas medidas resultou em uma diferença de aproximadamente 34°C ao longo do período considerado (aproximadamente 5°C em junho de 2011 a aproximadamente 39°C em janeiro de 2012).

Em seguida, podemos observar que P1 apresentou menor diferença entre os picos de temperatura, se mantendo mais estável que P2 e que as temperaturas externas em todos os meses do ano. Essa diferença foi de aproximadamente 21°C ao longo do período considerado (aproximadamente 12°C em junho de 2011 a aproximadamente 33°C em janeiro de 2012 – uma diferença de 7°C a mais que o mínimo das temperaturas externas e 6°C a menos que o máximo das temperaturas externas).

Por fim, podemos observar que P2 possui um comportamento intermediário, com menor diferença com relação às temperaturas externas e maior que as temperaturas internas de P1. Em P2 a diferença foi de aproximadamente 28°C ao longo do período considerado (aproximadamente 9°C em junho de 2011 a aproximadamente 37°C em maio de 2011 – uma diferença de 4°C a mais que o mínimo das temperaturas externas, porém, 3°C a mais que o registrado em P1 e apenas 2°C a menos que o máximo das temperaturas externas, e 4°C a mais que o registrado em P1). Apesar da coincidência de a temperatura de P2 estar 4°C mais alta que os mínimos analisados externamente e em P1, este não é um valor constante, portanto não se pode tomar esta informação como conclusiva.

Por meio das observações mensais nota-se que P1 sempre consegue manter um comportamento mais estável que P2, o que mostra que, em uma análise geral, considerando apenas as temperaturas do ar, P1 confirma mais uma vez que possui um desempenho melhor que P2, mantendo as temperaturas do ar internas mais amenas que o exterior em períodos de calor e mais quentes que o exterior em períodos de frio.

5.4 VERIFICAÇÃO DO POTENCIAL DE ECONOMIA DE ENERGIA PARA CONDICIONAMENTO ARTIFICIAL

É sabido que uma das funções da arquitetura é contribuir para minimizar as diferenças entre as temperaturas internas e externas da edificação através de soluções passivas de condicionamento; desta maneira é possível reduzir a potência necessária dos equipamentos de refrigeração ou aquecimento, caso tenham que ser utilizados e, em épocas do ano de condições térmicas climáticas amenas, talvez o uso contínuo destes equipamentos seja dispensável, inclusive.

Um dos principais objetivos desta pesquisa é quantificar experimentalmente a economia de energia elétrica utilizada para condicionamento artificial do interior de uma edificação, promovida pela cobertura verde, tendo como referência uma edificação com cobertura cerâmica e tomando como base o estudo de comportamento térmico das edificações (P1 e P2).

O comportamento térmico em uma edificação não condicionada é caracterizado pela sua resposta térmica frente às condições típicas de exposição ao clima e de ocupação. Isto pode ser determinado tanto por meio de medições “in loco” (caso desta pesquisa), quanto por meio de cálculos, utilizando softwares de simulação (Akutsu, 1998).

Conforme Van Deventer *apud* Goulart (1993), desempenho térmico de uma edificação depende basicamente de dois processos: o primeiro é a transferência de calor através dos diferentes componentes da estrutura e o segundo é o fluxo de ar por ventilação e/ou infiltração. A economia de energia está representada, neste trabalho, pelo diferencial de carga térmica determinado entre os dois protótipos.

A carga térmica total de um determinado espaço construído pode ser calculada pela Equação 5.1, a seguir, de acordo com a NBR 16401-1:2008. Para esta pesquisa, levou-se em conta a penetração de calor por condução, convecção e radiação, desprezando-se a contribuição de calor de pessoas e equipamentos. Para o cálculo também não serão consideradas as contribuições das paredes, janelas e portas por serem iguais nos dois protótipos, isto é, só será computada a contribuição das coberturas.

$$Q = U.A.\Delta t \text{ (Equação 5.1)}$$

Onde:

Q = Carga térmica (W)

U = Coeficiente global de transferência de calor ($\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$)

A = Área (m^2)

Δt = Diferença de temperatura do ar externo e interno ($^\circ\text{C}$)

O coeficiente global de transferência de calor (U) da cobertura com telha cerâmica e forro de PVC será considerado igual a $1,75\text{W/m}^2\cdot\text{K}$ de acordo com Lamberts et al (2010), valor este referente à pesquisa do referido autor com composição de telhado idêntica ao desta. O mesmo coeficiente para a cobertura verde será considerado $0,2\text{W/m}^2\cdot\text{K}$, de acordo com o desenvolvido pelo trabalho de Niachou et al (2001). Estes coeficientes foram adotados de acordo com as pesquisas que mais se assemelharam a esta, visto que a NBR 15220-3:2005 não indica nenhum valor de U para cobertura cerâmica com forro de PVC, tampouco para cobertura verde. Também, nesta pesquisa, não será considerado o efeito da evapotranspiração da vegetação, sendo este aspecto a ser explorado em futuras pesquisas de doutorado.

O cálculo da carga térmica foi efetuado para P1 e P2 nos dias representativos de verão e inverno, para cada temperatura interna do ar coletada ao longo destes dias. Para os cálculos de verão foi criada uma curva comparativa entre as condições para cada protótipo e a carga térmica necessária para manter o interior da edificação em 24°C . Para os cálculos de inverno foi utilizado o mesmo procedimento.

A diferença entre a curva de carga térmica necessária para manter a edificação em 24°C e a curva obtida considerando as temperaturas coletadas no local resulta na economia de energia para aquecimento ou resfriamento de cada protótipo para um dia representativo de verão e outro de inverno.

Observando os Gráficos 5.35 a 5.38 é possível perceber a diferença entre as cargas térmicas de P1 e P2 e entre a carga necessária para se atingir a temperatura de conforto.

De acordo com os valores de temperatura do ar medidos, no período de verão ficou claro que P1 não requer condicionamento artificial em nenhum horário do dia ou da noite; entretanto, P2 necessita de resfriamento entre 11h e 15h, aproximadamente. Como pode ser observado nas curvas de carga térmica do Gráfico 5.35, no período de verão existem diferenças consideráveis entre os valores de carga térmica de P1 e P2 para resfriamento, da ordem de até 30W , quando o condicionamento artificial é necessário. Elas se tornam iguais

por volta das 6:00h da manhã, quando a temperatura do ar interno em P1 é de 23,3°C e em P2 é de 22,5°C, passando, daí para frente, a se distanciarem; voltam a se igualar novamente por volta das 12:40h, quando a temperatura do ar interno em P1 é de aproximadamente 26,40°C e em P2 é 27,90°C. Para que o ambiente seja mantido à temperatura constante de 24°C, temperatura essa tomada como referência para conforto, P2 necessitaria de condicionamento artificial tanto para resfriar quanto para aquecer; entretanto, para resfriar, em P2 seria necessário retirar uma carga de cerca de 60W maior do que em P1, no período das 8h às 19h; nos demais horários seria necessário aquecer e o valor da carga térmica chega a ser até 45W maior do que em P1. (Gráfico 5.36). Este fato, obviamente decorre da diferença dos valores dos coeficientes globais de transferência de calor dos respectivos tetos, o que promove diferenças de temperaturas internas em P1 e P2, conforme já demonstrado nas análises anteriores.

Gráfico 5.35 – Carga térmica no dia representativo de verão em P1 e P2

Gráfico 5.36 – Carga térmica no dia representativo de verão em P1 e P2, necessária para atingir 24°C

No inverno, as diferenças de carga térmica são menores, conforme mostra o Gráfico 5.37, sendo de até 45W para aquecimento se necessário. De acordo com o que se observa no Gráfico 5.38, ambas tipologias requerem aquecimento mas em P1 essa necessidade poderia ser suprida com equipamento de menor potência, o que não ocorre em P2 que, para ser aquecido, necessita de equipamento até 60W mais potente. Já para se manter os ambientes dos protótipos à temperatura constante em 24°C no inverno, P2 requer equipamento até 100W mais potente, conforme ilustrado pelo Gráfico 38. Isto significa que a cobertura de P1 promove maior isolamento térmico que a de P2, o que leva a uma maior economia de energia para condicionamento artificial em P1.

É importante ressaltar que os valores absolutos baixos de carga térmica serviram apenas para comparação do desempenho térmico entre as duas tipologias e não servem para dimensionamento de equipamentos de climatização porque, para os cálculos só foi considerada a contribuição dos tetos.

Gráfico 5.37 – Carga térmica no dia representativo de inverno em P1 e P2

Gráfico 5.38 – Carga térmica no dia representativo de inverno em P1 e P2, necessária para atingir 24°C

6. CONCLUSÕES

Os dados coletados durante os meses de abril de 2011 a janeiro de 2012, relativos às medições nos dois protótipos, tratados estatisticamente, permitiram analisar o comportamento térmico de ambos e enfatizar alguns episódios de medição e identificar um padrão de comportamento térmico por período do ano. De posse destas informações foi possível concluir a respeito do desempenho térmico dos sistemas de cobertura verde em relação ao sistema de cobertura cerâmica verificando o potencial de economia de energia para climatização do ambiente.

Inicialmente era esperado que a cobertura verde tivesse maior potencial econômico, devido às suas características. Esta expectativa se confirmou à medida que as análises foram realizadas.

O protótipo com cobertura verde tem um desempenho melhor que o protótipo com cobertura cerâmica em períodos de frio e calor. Mesmo sem condicionamento artificial, a edificação com cobertura verde conseguiu, nas condições de verão analisadas, atingir as condições que a NBR 6401/08 considera como de conforto; já a edificação com cobertura cerâmica, sob as mesmas condições, apontou a necessidade de condicionamento artificial para atingir os mesmos resultados. Sob as condições de inverno analisadas, as duas edificações apontaram a necessidade de condicionamento artificial para atingirem as condições consideradas na norma, entretanto, observou-se que a edificação com cobertura verde necessitaria de 10 vezes menos potência para aquecimento que a outra, promovendo assim, menor gasto energético com condicionamento artificial.

Ainda foi possível observar, através das análises realizadas, que a edificação com cobertura verde apresentou menores flutuações de temperatura interna e umidade ao longo do dia, em relação aos valores externos e aos valores obtidos e observados na edificação com telha cerâmica.

Também foi comprovado que a cobertura verde promove maior isolamento térmico da edificação, em relação à cobertura cerâmica. A cobertura verde apresentou temperatura interna menor que a temperatura externa quando da hora mais quente do dia, e a temperatura interna maior que a temperatura externa quando da hora mais fria do dia. Já a mesma relação nem sempre se observou a respeito da telha cerâmica.

A temperatura de ponto de orvalho na edificação com cobertura verde se apresentou menor que a temperatura do ar interior em todo o período analisado, o que significa que não

há risco de condensação no interior da edificação. Apesar de ser um sistema que retém umidade em seu interior, o que poderia esfriar o teto e possibilitar a condensação da umidade, esta condição não ocorreu; no entanto, sob algumas condições térmicas, na edificação com cobertura cerâmica, ocorreram situações, no verão, em que eventualmente poderia haver condensação do vapor de água do ar no teto, embora este fato não tenha sido observado durante as visitas feitas ao protótipo.

As análises realizadas utilizando os dados de temperatura superficial das paredes com o objetivo de se determinar se havia influência do teto no comportamento térmico das paredes não foram conclusivas em nenhuma das duas edificações, sendo necessárias análises mais detalhadas, considerando mais variáveis e utilizando outros recursos, como, por exemplo, a termografia.

Tendo em vista as análises feitas, é possível afirmar que o desempenho térmico dos protótipos se dá conforme esperado. Todas as condições supostas de acordo com o conhecimento teórico dos sistemas de cobertura verde puderam ser verificadas satisfatoriamente.

O telhado verde, como se observou, promove menos flutuações de temperatura e umidade no ambiente e permite que se atinjam mais facilmente condições de conforto para o usuário; promove uma economia de energia através da minimização da utilização de dispositivos de condicionamento, além do aumento da vida útil da edificação, já que o estresse da estrutura por intempéries é menor. A hipótese levantada é, portanto, válida, e os objetivos específicos da pesquisa foram atingidos.

Ressalta-se que a importância da elaboração e divulgação deste material se dá devido às consequências ambientais da alta demanda de energia elétrica nos períodos quentes do ano, quando a maioria dos usuários adquire equipamentos de condicionamento de ar, sobrecarregando a rede elétrica e intensificando os efeitos das ilhas de calor.

Acredita-se que a economia de energia para climatização dos ambientes proporcionada pelas coberturas verdes terá impacto positivo nesta demanda, diminuindo o déficit energético destes períodos do ano e poupando os recursos naturais.

A longo prazo, o proprietário de uma edificação com cobertura verde, inclusive, conseguirá recuperar o investimento inicial com sua execução, aproveitando os benefícios que a cobertura verde traz para o local onde está inserida e a economia financeira que provavelmente conseguirá ao diminuir seu gasto energético.

7. TRABALHOS FUTUROS

Este estudo abre campo para outras pesquisas correlacionadas, visando ampliar o conhecimento que se tem a respeito deste sistema de coberturas e exploração mais aprofundada de suas potencialidades.

São sugestões para contribuições futuras:

- ✓ Estudos complementares sobre a condutibilidade térmica da cobertura verde.
- ✓ Estudo de desempenho térmico com coberturas verdes do tipo intensivo.
- ✓ Estudo do potencial da cobertura verde em reduzir os efeitos das ilhas de calor.
- ✓ Estudo sobre a capacidade de retenção hídrica das coberturas verdes para minimizar os efeitos das inundações.
- ✓ Estudo sobre a aplicação da cobertura verde como elemento de filtragem da água de chuva para reaproveitamento.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKUTSU, M. *Método para Avaliação do Desempenho Térmico de Edificações no Brasil*. 1998. 156 p. Tese (Doutorado) – Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Universidade de São Paulo. São Paulo, 1998;

AMERICAN HYDROTECH INC. Disponível em: < <http://www.hydrotechusa.com/garden-roof.htm>>. Último acesso em: 10 mar. 2011;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Norma 15220-3:2005. Desempenho térmico de edificações. Parte 3: Zoneamento Bioclimático Brasileiro e Diretrizes Construtivas para Habitações Unifamiliares de Interesse Social*. Rio de Janeiro, 2005;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Norma 15575-1:2008. Edifícios Habitacionais de até Cinco Pavimentos – Desempenho. Parte 1: Requisitos Gerais*. Rio de Janeiro, 2008;

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *Norma 16401-2:2008. Instalações de Ar Condicionado – Sistemas Centrais e Unitários. Parte 1: Projetos das Instalações*. Rio de Janeiro, 2008;

BENEVOLO, Leonardo. *História da Arquitetura Moderna*; São Paulo: Editora Perspectiva, 2001;

BUENO, André Duarte. *Transferência de Calor e Umidade em Telhas: Simulação e Análise Experimental*. 1994. 133p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1994;

DEL BARRIO, Elena Palomo. *Analysis of the Green Roofs Cooling Potential in Buildings*. Journal of Energy and Buildings, Amsterdam, v. 27, p.179-193, 1998;

GETTER, K. L.; ROWE, D. B. *The Role of Extensive Green Roofs in Sustainable Developments*. HortScience: American Society for Horticultural Science. Michigan: AshsPublications, 2006, p. 1276-1285;

GOULART, S. V. G. *Dados Climáticos para Avaliação de Desempenho Térmico em Edificações em Florianópolis*. 1993. 111p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1993;

GOULART, S. V. G; LAMBERTS, R.; FIRMINO, S. *Dados Climáticos para Projeto e Avaliação Energética de Edificações para 14 Cidades Brasileiras*; Florianópolis: Núcleo de Pesquisa em Construção/UFSC, 1998; 345p.;

GREEN ROOF SERVICE LLC. Disponível em: <<http://www.greenroofservice.com/>>. Último acesso em: 03 mai. 2009;

HOLBROOK, C. C.; STALKER, H. T. *Peanut Breeding and Genetic Resources*. Plant Breeding Reviews, v. 22, p. 297-355, 2002;

INTERNATIONAL GREEN ROOF ASSOCIATION. Disponível em: <<http://www.igra-world.com/index.php>>. Último acesso em: 16 abr. 2009;

INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. ISO 7726: *Thermal Environments – Instruments and Methods for Measuring Physical Quantities*. Genebra, 1998;

(IAG, 2011b) INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. *Boletim Climatológico Trimestral da Estação Meteorológica do IAG/USP – JJA 2011 – Inverno*. Seção Técnica de Serviços Meteorológicos. São Paulo, 2011. 27p.;

(IAG, 2011a) INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. *Boletim Climatológico Trimestral da Estação Meteorológica do IAG/USP – MAM 2011 – Outono*. Seção Técnica de Serviços Meteorológicos. São Paulo, 2011. 27p.;

(IAG, 2011c) INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. *Boletim Climatológico Trimestral da Estação Meteorológica do IAG/USP – SON 2011 – Primavera*. Seção Técnica de Serviços Meteorológicos. São Paulo, 2011. 26p.;

(IAG, 2011d) INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. *Variáveis Meteorológicas Mensais da Cidade de São Paulo – Ano de 2011*. Seção Técnica de Serviços Meteorológicos. São Paulo, 2011;

(IAG, 2012) INSTITUTO DE ASTRONOMIA, GEOFÍSICA E CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS DA UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO. *Variáveis Meteorológicas Mensais da Cidade de São Paulo – Janeiro de 2012*. Seção Técnica de Serviços Meteorológicos. São Paulo, 2012;

JIM, C.Y; TSANG, S.W. *Biophysical Properties and Thermal Performance of an Intensive Green Roof*. Journal of Building and Environment, Amsterdam, v. 46, p.1263-1274, 2011;

LAMBERTS, R. et al. *Catálogo de Propriedades Térmicas de Paredes e Coberturas*. Florianópolis: Laboratório de Eficiência Energética em Edificações/UFSC, 2010. 13p.;

LEITE, Brenda Chaves Coelho. *Sistema de Ar Condicionado com Insuflamento pelo Piso em Ambientes de Escritórios: Avaliação do Conforto Térmico e Condições de Operação*. 2003. 152 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2003;

LENGEN, Johan van. *Manual do Arquiteto Descalço*. São Paulo: Empório do Livro, 2008; 709p.;

LIU, K.; BASKARAN, B. *Thermal Performance of Green Roofs Through Field Evaluation*. In: FIRST NORTH AMERICAN GREEN ROOF INFRASTRUCTURE CONFERENCE, AWARDS AND TRADE SHOW, Chicago, 2003. Anais. Chicago: Green Roofs for Healthy Cities, 2003;

LOPES, Daniela A. R. *Avaliação do Comportamento Térmico de Coberturas Verdes Leves (CVLs) Aplicadas aos Climas Tropicais*. 2007. 145p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007;

LORENZI, H.; SOUZA, H. M. *Plantas Ornamentais no Brasil: Arbustivas, Herbáceas e Trepadeiras*. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2001; 1122p.;

MACHADO, M. V.; BRITTO, C.; NEILA, J . *El Cálculo de la Conductividad Térmica Equivalente en la Cubierta Ecológica*. Revista Ambiente Construído, Porto Alegre, v.3, n.3, p.65-76, 2003;

MACIEL, Carlos Alberto. *Vila Savoye: Arquitetura e Manifesto*. Portal Vitruvius. Arquitextos 024. Texto especial 133, maio 2002. Disponível em: <<http://www.vitruvius.com.br/arquitextos/arq000/esp133.asp>>. Último acesso em: 25 mar. 2009;

MINKE, Gernot. *Techos Verdes. Planificación, Ejecución, Consejos Prácticos*. Montevideu, Uruguai: Editora Fin de Siglo, 2004; 85p.;

MORAIS, Caroline Santana de. *Desempenho Térmico de Coberturas Vegetais em Edificações na Cidade de São Carlos – SP*. 2004. 106p. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, 2004;

NIACHOU, A. et al. *Analysis of the Green Roof Thermal Properties and Investigation of its Energy Performance*. Journal of Energy and Buildings, Amsterdam, v. 33, p.719-729, 2001;

OSMUNDSON, Theodore. *Roof Gardens: History, Design and Construction*. W.W.Norton & Company, Nova Iorque, 1999;

PARIZOTTO, S. LAMBERTS, R. *Investigation of Green Roof Performance in Temperature Climate: A Case Study of an Experimental Building in Florianópolis City, Southern Brazil*. Journal of Energy and Buildings, Amsterdam, v. 43, p.1712-1722, 2011;

PECK, S.; KUHN, M. *Design Guidelines for Green Roofs*. Disponível em: <<http://www.cmhc.ca/en/inpr/bude/himu/coedar/loader.cfm?url=/commonspot/security/getfile.cfm&PageID=70146>>. Último acesso em: 16 mar. 2009;

SNODGRASS, E.; SNODGRASS, L. *Green Roof Plants: a Resource and Planting Guide*. Timber Press, Inc., Londres, 2006;

TARIFA, J. R.; AZEVEDO, T. R. *Os Climas na Cidade de São Paulo: Teoria e Prática*. São Paulo: Departamento de Geografia, FFLCH, USP, 2001; 199p.;

THEODOSIOU, THEODORE G. *Summer Period Analysis of the Performance of a Planted Roof as a Passive Cooling Technique*. Journal of Energy and Buildings, Amsterdam, v. 35, p.909-917, 2003;

TSANG, S.W.; JIM, C.Y. *Theoretical Evaluation of Thermal and Energy Performance of Tropical Green Roofs*. Journal of Energy, Amsterdam, v. 36, p.3590-3598, 2011;

WONG, M. *Environmental Benefits of Green Roofs*. Singapore Hitchins Group, 2006;

WONG, N.H. et al. *Study of Thermal Performance of Extensive Rooftop Greenery Systems in the Tropical Climate*. Journal of Building and Environment, Amsterdam, v. 42, p. 25-54, January, 2007.

ANEXOS

Este Anexo contém os Gráficos citados no texto, relativos aos episódios climáticos representativos de cada estação.

**Gráfico A.1 – Comportamento da parede 2 em P1 no dia mais quente do inverno
(parede com maior incidência solar)**

**Gráfico A.2 – Comportamento da parede 2 em P2 no dia mais quente do inverno
(parede com maior incidência solar)**

**Gráfico A.3 – Comportamento da parede 3 em P1 no dia mais quente do inverno
(parede com menor incidência solar)**

**Gráfico A.4 – Comportamento da parede 3 em P2 no dia mais quente do inverno
(parede com menor incidência solar)**

Gráfico A.5 – Comportamento da parede 2 em P1 no dia mais frio do outono (parede com maior incidência solar)

Gráfico A.6 – Comportamento da parede 2 em P2 no dia mais frio do outono (parede com maior incidência solar)

Gráfico A.7 – Comportamento da parede 3 em P1 no dia mais frio do outono (parede com menor incidência solar)

Gráfico A.8 – Comportamento da parede 3 em P2 no dia mais frio do outono (parede com menor incidência solar)

Gráfico A.9 – Comportamento da parede 2 em P1 no dia com maior amplitude térmica do verão (parede com maior incidência solar)

Gráfico A.10 – Comportamento da parede 2 em P2 no dia com maior amplitude térmica do verão (parede com maior incidência solar)

Gráfico A.11 – Comportamento da parede 3 em P1 no dia com maior amplitude térmica do verão (parede com maior incidência solar)

Gráfico A.12 – Comportamento da parede 3 em P2 no dia com maior amplitude térmica do verão (parede com maior incidência solar)

Gráfico A.13 – Comportamento da parede 2 em P1 no dia menor amplitude térmica do verão (parede com maior incidência solar)

Gráfico A.14 – Comportamento da parede 2 em P2 no dia menor amplitude térmica do verão (parede com maior incidência solar)

Gráfico A.15 – Comportamento da parede 3 em P1 no dia menor amplitude térmica do verão (parede com menor incidência solar)

Gráfico A.16 – Comportamento da parede 3 em P2 no dia menor amplitude térmica do verão (parede com menor incidência solar)

Gráfico A.17 – Comportamento da parede 2 em P1 no dia com menor umidade relativa da primavera (parede com maior incidência solar)

Gráfico A.18 – Comportamento da parede 2 em P2 no dia com menor umidade relativa da primavera (parede com maior incidência solar)

Gráfico A.19 – Comportamento da parede 3 em P1 no dia com menor umidade relativa da primavera (parede com menor incidência solar)

Gráfico A.20 – Comportamento da parede 3 em P2 no dia com menor umidade relativa da primavera (parede com menor incidência solar)

Gráfico A.21 – Umidade do ar no dia mais quente de outono

Gráfico A.22 – Umidade do ar no dia mais quente de verão

Gráfico A.23 – Temperatura do ar e umidade relativa no dia mais frio do verão

Gráfico 5.24 – Temperatura do ar e umidade relativa no dia com maior amplitude térmica do outono

Gráfico A.25 – Temperatura do ar e umidade relativa no dia com menor amplitude térmica da primavera

Gráfico A.26 – Temperatura do ar e umidade relativa no dia com menor umidade relativa do outono