

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ARQUITETURA E URBANISMO

Alberto Lohmann

**DESEMPENHO HIGROTÉRMICO DE COBERTURA VEGETAL
INCLINADA EM DOIS PROTÓTIPOS CONSTRUÍDOS NA REGIÃO DE
FLORIANÓPOLIS**

Dissertação de Mestrado

Florianópolis, julho de 2008

Alberto Lohmann

**DESEMPENHO HIGROTÉRMICO DE COBERTURA VEGETAL INCLINADA EM
DOIS PROTÓTIPOS CONSTRUÍDOS NA REGIÃO DE FLORIANÓPOLIS**

Dissertação apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em
Arquitetura e Urbanismo da
Universidade Federal de Santa
Catarina como requisito para
obtenção do grau de Mestre em
Arquitetura e Urbanismo

Orientador: Prof. Fernando Barth, Dr.

Florianópolis, julho de 2008

Alberto Lohmann

**DESEMPENHO HIGROTÉRMICO DE COBERTURA VEGETAL
INCLINADA EM DOIS PROTÓTIPOS CONSTRUÍDOS NA REGIÃO DE
FLORIANÓPOLIS**

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de

MESTRE EM ARQUITETURA E URBANISMO

na especialidade PROJETO E TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO –
SISTEMAS E PROCESSOS CONSTRUTIVOS e aprovada em sua forma final pelo
Programa de Pós-Graduação em Arquitetura e Urbanismo – PósARQ da
Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC.

Florianópolis, julho de 2008.

Orientador / Moderador / Presidente: Dr. Fernando Barth, PósARQ – UFSC

Coordenadora do PósARQ: Dra. Carolina Palermo

BANCA EXAMINADORA:

Avaliador 1: Dr. Wilson Jesus da Cunha Silveira, PósARQ – UFSC

Avaliador 2: Dra. Alina Gonçalves Santiago, PósARQ – UFSC

Avaliador 3: Dra. Ana Lígia Papst, UNISUL

Aos meus pais, Ilson e Valéria, e aos
meus irmãos Leonardo e Emílio.

Agradecimentos

Aos meus pais que me deram estrutura, tanto no que diz respeito à educação, quanto ao suporte familiar necessário para conseguir terminar o mestrado.

À minha namorada Carla, que me deu apoio durante os anos da minha formação acadêmica, profissional e pessoal e que está ao meu lado na realização dos meus sonhos.

Ao meu irmão mais velho, Leonardo, pelos livros enviados para o meu estudo.

Ao meu irmão mais novo, Emílio, pelo apoio e incentivo.

À minha prima que, sendo companheira de profissão, possibilitou trocas de experiências através das várias conversas, sobretudo no que diz respeito à arquitetura.

Ao professor Fernando Barth pela orientação e pelo conhecimento passado durante o período do mestrado.

Aos membros da banca pelas observações e incentivos.

Ao Laboratório de Sistemas Construtivos pelo espaço e pelos equipamentos cedidos.

À empresa Movimax, que cedeu as placas cimentícias de madeira mineralizadas para a realização do trabalho.

Ao Ricardo Cremer, representante da empresa Movimax, pela disponibilidade e pelas placas.

Ao amigo Fernando Sandin, colega de projetos, pela parceria.

A todos que, de uma forma ou de outra, fizeram parte da minha vida durante esses 27 anos de aprendizado.

Resumo

A cobertura vegetal é uma alternativa para sistemas de coberturas em edificações, tanto inclinadas como planas. Este trabalho consiste em relatar um breve histórico de soluções vernaculares a projetos contemporâneos, descrevendo algumas tipologias, características e materiais empregados na execução de coberturas. Também se descreve aqui a construção de dois protótipos realizados com placas cimentícias de madeira mineralizada e laje de cobertura. Escolheram-se coberturas inclinadas, pois são comumente utilizadas na região de Florianópolis, com a vantagem de apresentarem escoamento rápido das águas pluviais, e coberturas vegetais, por apresentarem certa inovação tecnológica na construção de edificações. Assim, foi projetada uma cobertura de fácil construção, podendo ser industrializada, capaz de melhorar o desempenho térmico de edificações e de utilizar sistemas de rápido estabelecimento de vegetação. Realizou-se a construção de dois protótipos a fim de que pudessem ser feitas simultaneamente as medições de desempenho higrotérmico para demonstrar a diferença de comportamento entre as coberturas vegetal, laje maciça e de fibrocimento, na região de Florianópolis. Os resultados obtidos apresentam melhoria no desempenho higrotérmico do protótipo com cobertura vegetal; desse modo, o trabalho traz uma alternativa em construções e reformas futuras para coberturas na região.

Palavras-chave: cobertura vegetal, desempenho, sistema construtivo.

Abstract

The green roof is an alternative for roofing systems, both as inclined and plane in any buildings. This dissertation consists in report its vernacular solutions through the history until the contemporaries projects, describing some typology, features and materials employed in roofs construction. Also, is described here the construction of two prototypes compound by cemented wood plaques, concrete roof slab. Was chosen the inclined roofs, because they are commonly used in the region of Florianopolis, with the advantage of a rapid flow of the rainwater and green roofs because they show some technological innovation in the construction of buildings. Thus, the coverage was designed for easy construction that could be industrialized, able to improve the thermal performance of buildings and by the use of quick establishment vegetation's systems. Was constructed two prototypes that could be measure simultaneously its hygrothermic performance to demonstrate the difference between the behavior of concrete roof slab, green roof and fiber cement covering in the region of Florianopolis. The results show some improvement in the hygrothermic performance of the prototype with green roof, therefore this study brings an alternative to construction and building's reform for roofing in the region.

Keywords: Green roof, performance, constructive system.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Localização de Florianópolis no mapa bioclimático.....	13
Figura 2 – Retenção da água na cobertura vegetal	16
Figura 3 – Diferença entre temperatura com e sem vegetação.....	16
Figura 4 – Zigurate de Ur, Iraque	20
Figura 5 – Desenho da seção dos Jardins Suspensos, baseado na descrição do arqueólogo Robert Koldewey	20
Figura 6 – Arquitetura do norte da Europa	21
Figura 7 – Museu em Eyjaf-jord, Islândia	21
Figura 8 – Camada retirada para as coberturas.....	22
Figura 9 – Casa de adobe, mistura de solo e vegetação	22
Figura 10 - Mont-Saint-Michel, França	22
Figura 11 - Palácio Piccolomi	22
Figura 12 - Palácio do Kremlin, em Moscou.....	23
Figura 13 – Terraço da <i>Villa Savoye</i> , construída em 1928.....	23
Figura 14 – Corte esquemático de um Terrassenhäuser, muito comum em condomínios.....	25
Figura 15 – Casa Hundertwasser.....	26
Figura 16 – Antigo Ministério da Educação e Saúde.....	26
Figura 17 – Montagem da Ecotelha	27
Figura 18 – Hotel Fazenda em Bom Retiro, SC	27
Figura 19 – Comparação entre as classificações de coberturas vegetais e considerações a respeito delas.....	29
Figura 20 - Medições de escoamento para diferentes superfícies	33
Figura 21 – Simulação de coberturas vegetais nas coberturas de Manhattan, Nova Iorque.....	34
Figura 22 – Crescimento da vegetação espontânea.....	37
Figura 23 – Esquema, comparando a quantidade de água nas calhas dos telhados.....	38
Figura 24 – Diferença de fluxo de calor entre uma laje e uma cobertura vegetal.....	41
Figura 25 – Condomínio em Dösseldorf, Alemanha, com coberturas verdes. Projeto dos arquitetos Bookhoff e Rentrop.....	47
Figura 26 - Esquema do funcionamento dos módulos de plástico	53
Figura 27 – Sobreposição da camada filtrante	54
Figura 28 – Mudas em estufas	58
Figura 29 – Manta de vegetação sendo retirada	58
Figura 30 – Planta	61
Figura 31 – Vista de topo	61
Figura 32 – Vista frontal	61
Figura 33 – Vista lateral esquerda.....	61
Figura 34 – Vista frontal	61
Figura 35 – Vista lateral direita.....	61
Figura 36 – Sugestão para localização, evitando sombreamento dos protótipos.	62
Figura 37 – Detalhe da cobertura vegetal na parte de saída de água e suas camadas.....	63
Figura 38 – Detalhe de montagem prévia da laje de cobertura.....	63
Figura 39 – Paredes com formas para pilares e vigas do protótipo.	64
Figura 40 – Escavação e nivelamento	65
Figura 41 – Preparo para base do radier	65

Figura 42 – Corte de todos os painéis.....	66
Figura 43 – Estocagem dos painéis, separados de acordo com suas características	66
Figura 44 – Fôrmas e ferragens do radier.....	67
Figura 45 – Concretagem do radier.....	67
Figura 46 – Montagem no solo dos painéis.....	68
Figura 47 – Montagem dos painéis com escoras.....	68
Figura 48 – Concretagem dos pilares.....	69
Figura 49 – Concretagem das vigas.....	69
Figura 50 – Montagem das formas da laje.....	69
Figura 51 – Concretagem da laje e sua ferragem.....	69
Figura 52 – Impermeabilização da cobertura vegetal.....	70
Figura 53 – Drenagem para água pluvial excedente.....	70
Figura 54 – Sobreposição de 20 cm da geomembrana.....	71
Figura 55 – Colocação da brita no perímetro da cobertura.....	71
Figura 56 – Preparação da base da cobertura vegetal.....	71
Figura 57 – Transplante das leivas do solo para a cobertura vegetal.....	71
Figura 58 – Cobertura vegetal pronta.....	72
Figura 59 - Cobertura de fibrocimento.....	72
Figura 60 - Calha localizada na base da cobertura.....	72
Figura 61 - Diferentes seções das paredes de PCM.....	74
Figura 62 – Detalhe das camadas e espessuras utilizadas para cálculo.....	75
Figura 63 – Equipamentos para as medições higrotérmicas.....	80
Figura 64 - Localização e identificação dos protótipos para colocação dos HOBOS®	80
Figura 65 - Localização do HOBOS® para medidas externas.....	80
Figura 66 - Localização dos HOBOS® na caixa térmica.....	82
Figura 67 - Localização dos HOBOS® no interior do protótipo.....	86

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Estratégias para infiltração, armazenamento e retardamento do escoamento de águas pluviais.....	31
Tabela 2 – Diferentes superfícies e seu respectivo coeficiente de escoamento.....	32
Tabela 3 – Estatísticas das temperaturas máximas diárias de acordo com um estudo em Toronto, Canadá num período de 660 dias.....	35
Tabela 4 – Temperaturas internas do ar (tbs) nos sistemas de cobertura.....	40
Tabela 5 – Superfícies de folhas por metro quadrado.....	42
Tabela 6 – Peso de materiais para substrato.....	45
Tabela 7 – Peso de materiais da construção civil.....	46
Tabela 8 – Tabela de classificação dos sistemas de impermeabilização.....	50
Tabela 9 – Tabela de materiais para formação do solo de coberturas vegetais.....	55
Tabela 10 – Requisitos para o sistema de vedação vertical.....	74
Tabela 11 – Valores para cada metro quadrado de vedação vertical.....	75
Tabela 12 – Requisitos para o sistema de cobertura.....	76
Tabela 13 – Valores de cálculo de desempenho térmico para cobertura com terra.....	76
Tabela 14 – Valores de cálculo de desempenho térmico para laje.....	77

Tabela 15 – Valores de cálculo de desempenho térmico para cobertura de fibrocimento.....	77
Tabela 16 - Critérios de desempenho quanto à transmitância térmica	78
Tabela 17 - Diferença entre as medidas de temperatura	84
Tabela 18 – Resultados comparativos entre laje e cobertura vegetal	90
Tabela 19 – Resultados comparativos entre telhamento e cobertura vegetal.....	92
Tabela 20 - Comparação entre os sentidos dos fluxos de calor.....	93

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Diferença entre o escoamento de águas em coberturas	32
Gráfico 2 - Diferença entre a hora legal e a hora solar para Florianópolis.	65
Gráfico 3 - Precisão indicada pelo fabricante para o HOBO® em diferentes temperaturas	79
Gráfico 4 - Curva psicrométrica simplificada	81
Gráfico 5 - Temperaturas obtidas nos três aparelhos dentro da caixa térmica	83
Gráfico 6 - Temperaturas obtidas pelo aparelho 03 e seus medidores externos dentro da caixa térmica	84
Gráfico 7 - Umidades absolutas obtidas pelos três aparelhos dentro da caixa térmica	85
Gráfico 8 – Temperaturas obtidas pelos aparelhos nos dois protótipos.....	87
Gráfico 9 - Umidades absolutas obtidas pelos aparelhos nos dois protótipos	87
Gráfico 10 - Medições comparativas de temperaturas entre a laje e a cobertura vegetal.....	88
Gráfico 11 - Medições comparativas de umidade absoluta entre a laje e a cobertura vegetal.....	89
Gráfico 12 - Medições comparativas de temperatura entre telhamento e cobertura vegetal.....	91
Gráfico 13 - Medições comparativas de umidade absoluta entre telhamento e cobertura vegetal	92
Gráfico 14 – Temperaturas no interior do protótipo 2 demonstrando o processo de estratificação do ar com cobertura de laje.....	94
Gráfico 15 – Temperaturas no interior do protótipo 2 demonstrando o processo de estratificação do ar com cobertura vegetal.....	95

Sumário

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA	15
1.2	DELIMITAÇÃO DO TEMA	17
1.3	OBJETIVOS	17
1.3.1	Geral	17
1.3.2	Específico	17
1.4	MÉTODOS	18
2	REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1	BREVE HISTÓRICO DAS COBERTURAS VEGETAIS	20
2.2	DEFINIÇÕES	28
2.3	EVAPOTRANSPIRAÇÃO	29
2.4	RETENÇÃO DE ÁGUA	30
2.5	POTENCIALIDADES DAS COBERTURAS VEGETAIS	34
2.6	FLUXO DE CALOR DA COBERTURA VEGETAL	41
2.7	POLUIÇÃO SONORA	43
2.8	PREVENÇÃO DE INCÊNDIO E RISCOS	44
3	PROJETO DE COBERTURAS VEGETAIS	45
3.1	CONSIDERAÇÕES ESTRUTURAIS	45
3.2	CONSIDERAÇÕES EM TELHADOS INCLINADOS COM VEGETAÇÃO	46
3.3	AÇÃO DE VENTOS EM COBERTURAS	47
3.4	SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO EM COBERTURAS VEGETAIS	48
3.5	CONSTRUÇÃO DE COBERTURAS VEGETAIS	49
3.5.1	Sistemas de Impermeabilização para Coberturas	50
3.5.2	Barreira de Proteção contra Raízes	51
3.5.3	Camada Drenante na Cobertura Vegetal	52
3.5.4	Substrato para Cobertura Vegetal	54
3.5.5	Camada Vegetal da Cobertura	56
3.5.6	Sistemas de Plantio de Coberturas Vegetais	57
4	PROJETO E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO	60
4.1	PROJETO	60
4.2	CONSTRUÇÃO	64
5	ANÁLISE DE DESEMPENHO TÉRMICO	74

5.1	DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DE DESEMPENHO TÉRMICO	74
5.1.1	Desempenho térmico das vedações verticais	74
5.1.2	Desempenho térmico das coberturas	75
5.2	ANÁLISE EXPERIMENTAL DE DESEMPENHO HIGROTÉRMICO	78
5.2.1	Verificação da uniformidade das medições entre os HOBOS®	82
5.2.2	Verificação da uniformidade de desempenho entre os protótipos	86
5.2.3	Verificação de desempenho entre laje e cobertura vegetal	88
5.2.4	Verificação de desempenho entre cobertura vegetal e fibrocimento	90
5.2.5	Verificação do processo de estratificação do ar no interior dos protótipos	93
6	CONCLUSÕES	96
6.1	QUANTO AOS MÉTODOS UTILIZADOS	97
6.2	QUANTO AO SISTEMA CONSTRUTIVO DO PROTÓTIPO	97
6.3	QUANTO AO SISTEMA COBERTURA VEGETAL UTILIZADO	98
6.4	QUANTO AO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO DOS PROTÓTIPOS	98
6.5	SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	100
	REFERÊNCIAS	101
	BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR	107
	APÊNDICES	110

1. INTRODUÇÃO

As coberturas de edificações são responsáveis pela proteção tanto do usuário quanto da própria construção e, também, recebem uma parcela considerável da radiação solar, de acordo com valores da radiação solar incidente sobre planos horizontais. Mesmo assim, muitas vezes, esse envoltório não tem um tratamento adequado, gerando problemas patológicos, comumente encontrados nas construções. Conforme o projeto de norma ABNT 02.136.01.007, deve-se executar a cobertura o mais rápido possível após a conclusão da estrutura principal da edificação, evitando-se patologias na edificação.

O presente trabalho trata do uso de plantas em telhados na região de Florianópolis, um sistema construtivo de cobertura que apresenta certa inovação tecnológica e com um crescente desenvolvimento na indústria da construção mundial.

A cidade de Florianópolis localiza-se no litoral da região sul do Brasil, sendo a capital do Estado de Santa Catarina. Segundo a parte 3 da NBR 15.220, que define as zonas bioclimáticas em oito, a cidade pertence à zona três, conforme a Figura 1, sendo essa zona responsável por 6,5% de todo território nacional.

Segundo a classificação de Köppen, o clima é do tipo Cfa definido como mesotérmico úmido, com chuvas distribuídas durante todo o ano. Segundo Goulart (1993) a umidade relativa média anual é de 82,7%, com temperatura média máxima de aproximadamente 20°C e mínima de 13°C. Essas características de alta umidade e temperatura média amena se devem ao fato de Florianópolis ter a maior parte do território localizado em uma ilha.

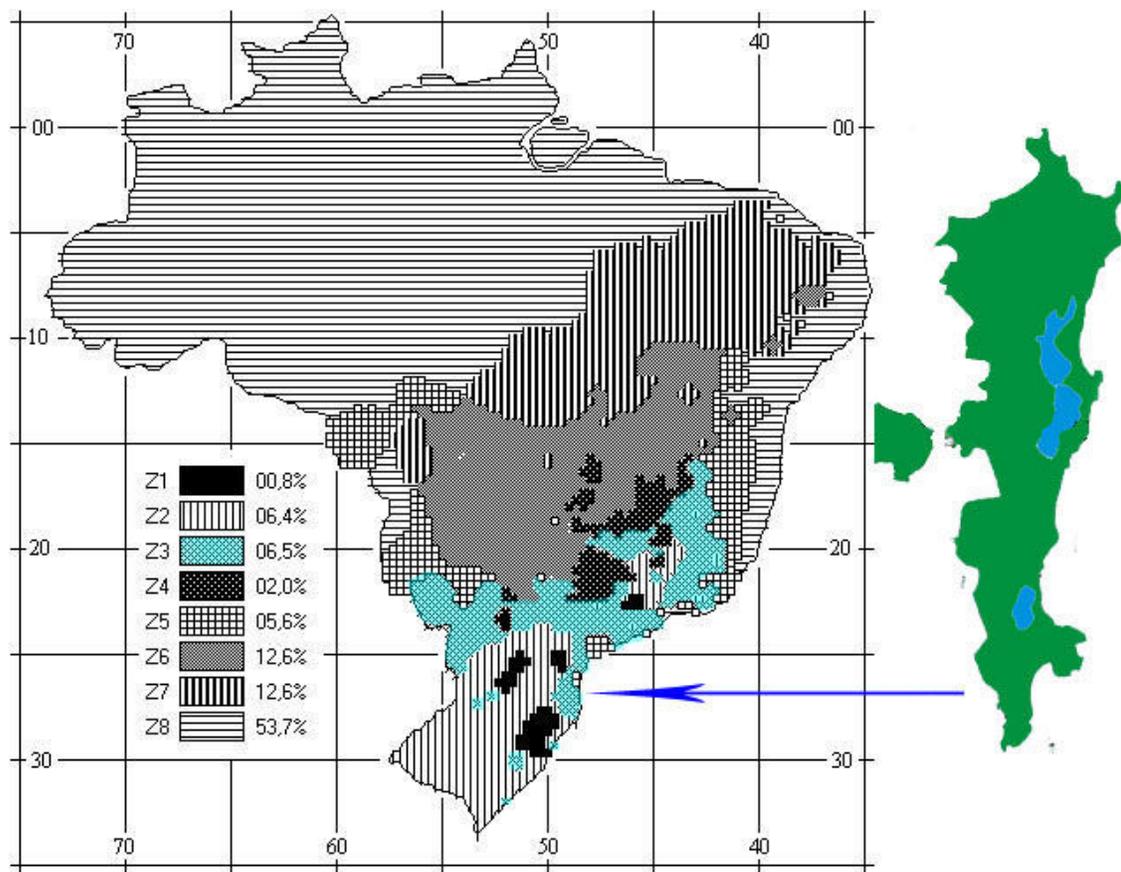


Figura 1 - Localização de Florianópolis no mapa bioclimático (Adaptação: NBR 15.220)

O uso de plantas em telhados contemporâneos se distingue das técnicas utilizadas anteriormente, pela integração da horticultura com o projeto e construção de edificações. Modificações estruturais para o seu suporte nos prédios, bem como o uso de novos materiais e produtos, melhorou o desempenho e, conseqüentemente, o aumento na aplicação de coberturas vegetais. Segundo Dunnet e Kingsbury (2004), desde a década de 50, na Europa, houve um aumento de áreas plantadas nos telhados, especialmente sobre edifícios de uso comercial, tanto em coberturas planas quanto inclinadas.

Nas primeiras aplicações de vegetais em coberturas, utilizavam-se áreas restritas a pequenos canteiros de prédios ou, ainda, o solo espalhado sobre a estrutura do telhado, que deveria ser muito resistente para suportar o peso, principalmente quando estava saturada. Após alguns estudos, as técnicas foram se aperfeiçoando e, hoje, existem várias opções construtivas para coberturas vegetais, desde as mais leves até as mais pesadas.

Nas referências bibliográficas referentes ao assunto, encontram-se várias denominações para o sistema. Dentre os termos utilizados na designação desse grupo de cobertura estão:

a) **Cobertura ou Telhado Verde** (*Green roof*) – A palavra “verde” está associada ao significado ecológico e também à sua própria cor. De modo geral, o “verde”, em edificações, significa práticas que reduzem o impacto ambiental causado pelas construções, bem como materiais e produtos que oferecem baixa manutenibilidade e alta durabilidade. Como exemplos, existem métodos de análise para obtenção do selo de “edificação verde”. Esses certificados são dados de acordo com as estruturas de avaliação do LEED (*Leadership in Energy and Environmental Design*), desenvolvido pelo *U.S. Green Building Council*, ou ainda do REEAM, *British Research Establishment Environment Assessment Method*, do BRE, *British Research Establishment*.

b) **Cobertura ou Telhado Vegetal** (*Planted roof*) – Essa nomenclatura tem um sentido mais amplo que a anterior, pois o termo vegetal abrange todas as espécies existentes e as utilizadas em edifícios. Inclui-se também, nesse contexto, o uso de água sobre o telhado, junto com plantas aquáticas, formando micro-sistemas.

c) **Cobertura ou Telhado Ecológico** (*Ecoroof, cubiertas ecológicas*) – De acordo com o conceito introduzido por Ernest Haeckel, em 1870, define-se historicamente ecologia como o conjunto de conhecimentos relacionados à economia da natureza – investigação de todas as relações entre o animal e seu ambiente orgânico e inorgânico, incluindo suas relações, amistosas ou não, com as plantas e animais que tenham com ele contato direto ou indireto. Assim, ecologia é o estudo das complexas inter-relações, chamadas por Darwin de condições da luta pela vida (adaptação SCHIEL, 2006).

Essa nomenclatura também é bastante ampla, pois pode ser usada para telhados feitos com materiais reciclados ou para aqueles que, em sua fabricação, utilizam materiais de baixo impacto ao ambiente.

d) **Cobertura ou Telhado Ajardinado** (*cubiertas ajardinadas*) – A palavra jardim significa um lugar fechado, podendo ter qualquer espécie vegetal e espaços para descanso. Essa expressão não se torna tão específica, como no caso de “telhados vegetais”, não abrangendo vegetações de crescimento espontâneo, que acontece com a colocação somente do solo, deixando que o próprio ambiente componha a cobertura.

Após a definição dos conceitos citados neste trabalho, utilizar-se-á a expressão “cobertura vegetal” para sua designação. Além de tal conceituação ser mais ampla, também há trabalhos científicos na área de Arquitetura e Urbanismo, que a utilizam.

1.1. JUSTIFICATIVA

Em termos compositivos, as coberturas possuem um grande impacto visual em construções com baixa altura, pois, em muitos casos, é o tratamento dado a elas que destacará a volumetria final da edificação. Também com a verticalização da cidade, têm-se outros ângulos de visão das coberturas, como no caso de uma vista dos pavimentos superiores das edificações mais altas para as menores. Isso demonstra a necessidade de um melhor tratamento na fase projetual dessa envolvente, bem como na sua manutenção.

As coberturas vegetais apresentam algumas vantagens em relação a outros sistemas de coberturas convencionais, tanto construtivamente, aumentando sua durabilidade, quanto ambientalmente através de melhorias no desempenho térmico do ambiente interno. A Figura 2 ilustra o recebimento de água pluvial por uma cobertura vegetal e os fenômenos relacionados como absorção, infiltração no solo e escoamento superficial, que aumenta quando o solo está saturado. Também ocorre, através da radiação solar e da fotossíntese, a evapotranspiração da água armazenada no solo e no vegetal para o ambiente. Já na Figura 3, ilustra-se a diferença entre as temperaturas superficiais externas em coberturas com laje impermeabilizada e cobertura vegetal.



Figura 2 – Retenção da água na cobertura vegetal (Fonte: Da Cunha, 2004)

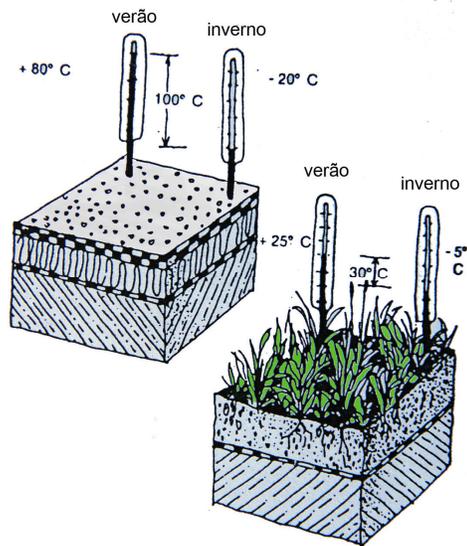


Figura 3 – Diferença entre temperatura com e sem vegetação (Adaptação: Minke, 2004)

De acordo com Morais e Roriz (2003), é possível através do bom desempenho térmico da cobertura vegetal durante o ano, manter as temperaturas mais amenas dentro da edificação. O estudo foi realizado com medições anuais, comparando uma laje plana com uma cobertura vegetal sobre outra laje plana na cidade de São Carlos, em São Paulo. Através da camada vegetal e de substrato, extingue-se a insolação direta na cobertura, causando a diminuição no ganho de calor e, conseqüentemente, evitando que as lajes tenham fissuras provocadas pela amplitude térmica, aumentando, assim, a vida útil da camada impermeabilizante.

Segundo Lamberts *et al* (1997), as coberturas vegetais são consideradas uma estratégia bioclimática, chamada de Resfriamento Evaporativo Indireto, que é uma solução arquitetônica obtida através da instalação de um tanque de água sobre o telhado ou até mesmo de um jardim. Com a incidência solar, ocorre a evapotranspiração do vegetal e da água contida no substrato, retirando o calor da cobertura e resfriando a superfície. Como conseqüência, há a redução da temperatura radiante média no ambiente interior, surgindo tal técnica como uma estratégia para diminuição do rigor térmico na edificação.

Por outro lado, com o crescimento da cidade e o aumento da superfície pavimentada, a paisagem natural dá lugar a diversas edificações, residências e construções urbanas, impermeabilizando o solo. As coberturas vegetais possibilitam

a transferência da área que antes era revestida com vegetação, para o topo da edificação, aumentando a permeabilidade do lote através da cobertura do edifício, absorvendo a água da chuva e retardando seu escoamento.

No Brasil, começaram a ser realizadas algumas obras com coberturas vegetais, utilizando ainda poucas inovações e sem o conhecimento técnico necessário, equiparando-se aos antigos terraços-jardins construídos na fase modernista da arquitetura brasileira. Assim, este estudo focou as técnicas construtivas e as camadas necessárias utilizadas em coberturas contemporâneas, desenvolvendo e adaptando-a para a região de Florianópolis, utilizando insumos locais e plantas nativas. Pensou-se também na eficiência das coberturas vegetais através da análise do desempenho de dois protótipos especialmente construídos para o presente trabalho.

1.2. DELIMITAÇÃO DO TEMA

Nesta pesquisa pretendeu-se analisar apenas uma proposta para um sistema construtivo de cobertura composto por vegetação, bem como seu desempenho térmico, comparando-o com outros sistemas existentes de cobertura. Avaliações quanto aos desempenhos acústicos, prevenção contra incêndio e de retenção de água não fazem parte da pesquisa, somente são referenciadas algumas citações como vantagens demonstradas em estudos feitos anteriormente por outros autores.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Geral

Analisar comparativamente o desempenho térmico de protótipos construídos com laje inclinada, telhas de fibrocimento e cobertura vegetal na região de Florianópolis.

1.3.2. Específicos

- a) Levantar o estado da arte das coberturas vegetais.

- b) Avaliar a aplicabilidade do sistema construtivo com cobertura vegetal na região de Florianópolis.
- c) Avaliar os sistemas construtivos de cobertura vegetal existentes e os materiais empregados na sua construção.
- d) Realizar medições simultâneas de temperatura e umidade do ar no interior dos dois protótipos.
- e) Avaliar comparativamente o desempenho térmico dos protótipos com laje inclinada, telhamento de fibrocimento e cobertura vegetal.

1.4. MÉTODOS

De acordo com os objetivos do trabalho, enumerados anteriormente, definiu-se alguns critérios para atingi-los, adotando no seu desenvolvimento os seguintes métodos de pesquisa:

a) **Pesquisas bibliográficas:** visam levantar dados referentes aos conceitos e construções de coberturas vegetais, com ênfase no desenvolvimento de técnicas construtivas. Buscou-se avaliar as camadas necessárias em alguns sistemas de cobertura vegetal, a fim de verificar a possibilidade de se construir com materiais encontrados na região de Florianópolis. Também foram abordados alguns estudos relacionados a esses sistemas de cobertura, avaliando as suas características e os fenômenos relacionados.

b) **Elaboração do projeto do protótipo:** Utilizaram-se, nessa etapa, ferramentas computacionais, seguindo requisitos pré-estabelecidos nos estudos e nas definições anteriormente realizadas.

O programa utilizado chama-se Google SketchUp, realizando as vistas, com as medidas do projeto e as perspectivas coloridas, apresentando as soluções construtivas e os materiais para o protótipo. Também se buscou com o projeto facilidade da execução na etapa de cortes dos painéis com suas identificações, medidas e respectivas quantidades.

c) **Construção dos dois protótipos:** Essa etapa busca materializar os conceitos que definiram o projeto, com vedações executadas com placas cimentícias de madeira mineralizada (PCM) e estrutura portante de concreto armado. As vedações também serviram de moldes incorporados à estrutura.

As ferramentas e materiais utilizados para a mistura do concreto *in loco* foi betoneira, areia, cimento, brita e água. No corte e fixação das vedações verticais em PCM: serra circular de mão com disco vídea, aparafusadeira elétrica, parafusos, silicone e argamassa de assentamento. A mão-de-obra foi realizada por uma mesma pessoa em todas as etapas construtivas.

d) **Medições de desempenho higrotérmico dos protótipos:** Os equipamentos utilizados para obtenção das temperaturas e umidades internas e externas foram três aparelhos HOBOTM família H8, sendo dois deles com sensores de temperatura e umidade e o outro com mais 2 sensores de temperatura externos ao aparelho.

As medições foram realizadas simultaneamente entre os aparelhos e nos dois protótipos no período de 11 de setembro a 28 de outubro de 2007, de acordo com as etapas descritas a seguir:

- medição das temperaturas e umidades dos aparelhos, realizadas simultaneamente dentro de uma caixa térmica composta por poliestireno revestido com plástico de dimensões de 66x36x46cm, verificando se os mesmos estariam de acordo com os valores de precisão estipulados pelo manual do fabricante;
- medições simultâneas entre os dois protótipos com as lajes expostas, a fim de verificar a igualdade dos mesmos no experimento, através da comparação entre as médias dos valores obtidas;
- medições simultâneas entre a laje e a cobertura vegetal, demonstrando sua eficiência em valores absolutos;
- medições simultâneas entre o telhamento de fibrocimento e a cobertura vegetal com o objetivo de comparação entre as duas soluções construtivas;

e) **Análise dos dados obtidos:** Utilizou-se o programa BoxCar Pro versão 4.0.7.0 da Onset Computer Corporation. Esse programa computacional gera os gráficos necessários e exporta os dados para arquivos em formato "txt".

A programação do aparelho se dá conectando o mesmo ao computador através de uma porta *serial*. Utilizando o comando *launch*, configura-se a hora de início e o intervalo de tempo entre as medições, que, conseqüentemente, calcula o horário de término. Após a medição, novamente se conecta o aparelho ao computador e, através do comando *Readout logger*, geram-se os gráficos com a escolha dos dados que se deseja demonstrar.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. BREVE HISTÓRICO DAS COBERTURAS VEGETAIS

Ao longo da história, o ser humano construiu várias obras com coberturas ajardinadas. Têm-se registros da sua utilização nas civilizações antigas do Rio Tigre e Eufrates e, posteriormente, no império Romano. Segundo Glancey (2001), as construções feitas entre os séculos XIV a.C e VI a.C, chamadas de Zigurates, conforme Figura 4, eram de pedra e acessadas por um conjunto de escadas com vegetação no topo. Os Zigurates foram descobertos pelo arqueólogo inglês Sir Leonard Woolley. Essa organização dos espaços tinha o objetivo de diminuir o calor das planícies da Mesopotâmia. Os jardins suspensos do palácio de Nabucodonosor II, na Babilônia, século V a.C, ilustrado na Figura 5, são considerados uma das sete maravilhas do mundo antigo e um dos exemplos mais importantes feitos por essas civilizações.

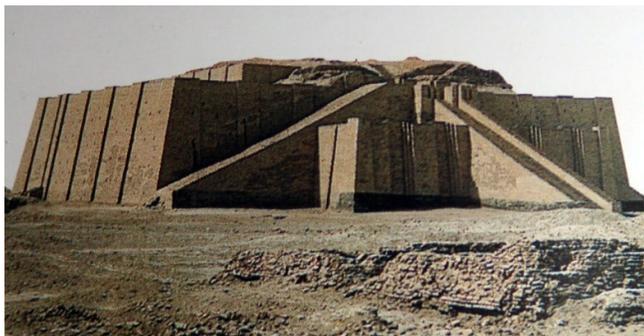


Figura 4 – Zigurate de Ur, Iraque (Fonte: GLANCEY, 2001)

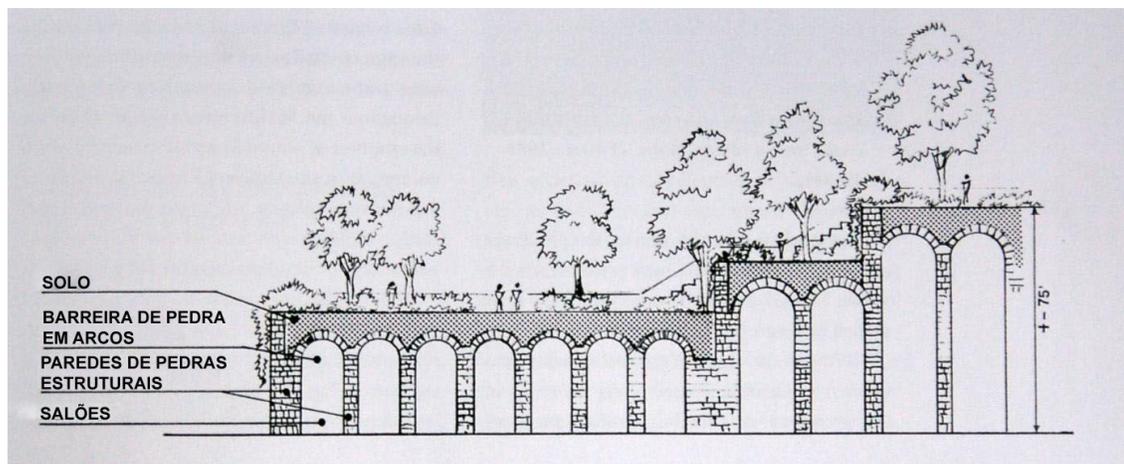


Figura 5 – Desenho da seção dos Jardins Suspensos, baseado na descrição do arqueólogo Robert Koldewey (Adaptação: OSMUNDSON, 1999)

Em países do norte da Europa, as coberturas vegetais extensivas foram empregadas nas construções pela baixa manutenibilidade, sendo parte da arquitetura vernácula de países da Escandinávia. Em função das extremas condições climáticas locais, utilizava-se esse sistema de cobertura pelo seu bom isolamento térmico, diminuindo a perda de calor da edificação para o exterior, conforme mostram as figuras seguintes: Figura 6 e Figura 7.



Figura 6 – Arquitetura do norte da Europa
(Fonte: WEBSHOTS, 2005)



Figura 7 – Museu em Eyjaf-jord, Islândia (Fonte: CRIT, 2006)

Os escandinavos cortavam a vegetação com a parte do solo contendo raiz e substrato, conforme mostra a

Figura 8, colocando-a acima da cobertura preparada. O objetivo era diminuir a perda de calor durante as longas noites de inverno. Segundo Emilsson (2006), a vida útil desse sistema construtivo era limitado, precisando substituição a cada 20 anos, principalmente pela decomposição da camada de cascas de árvore, colocadas sob a vegetação que, com o tempo, perdiam a função de impermeabilização em escamas.

Existem exemplos de coberturas ajardinadas também no Kurdiquistão, que abrange Turquia, Iraque, Iran e áreas vizinhas. Os kurdos, por sua vez, faziam casas com uma mistura de solo e vegetação, conforme Figura 9, facilitando o crescimento das plantas sobre a superfície. Através do forte calor e tendo o solo como material com um bom desempenho em relação à capacidade e inércia térmica,

a edificação se mantinha refrigerada de dia, armazenando o calor para as noites mais frias.

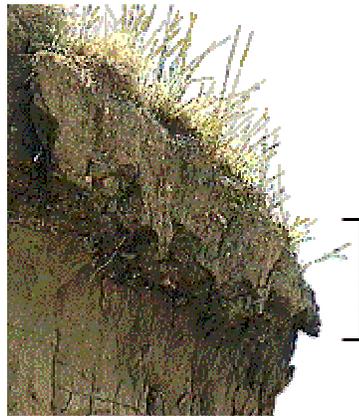


Figura 8 – Camada retirada para as coberturas
(Fonte: COLLINS, 2005)



Figura 9 – Casa de adobe, mistura de solo e vegetação
(Fonte: PETERS, 2005)

Da Idade Média à Renascença, construíram-se pouco desses terraços, restringindo-se a palácios de nobres e edificações monumentais, como no caso do Monastério de Saint-Michel, construído no século XIII, localizado no Golfo de Saint-Malo, região noroeste da França. O terraço é localizado no topo do edifício com vista para o golfo, conforme Figura 10.



Figura 10 - Mont-Saint-Michel, França (Fonte: OSMUNDSON, 1999)

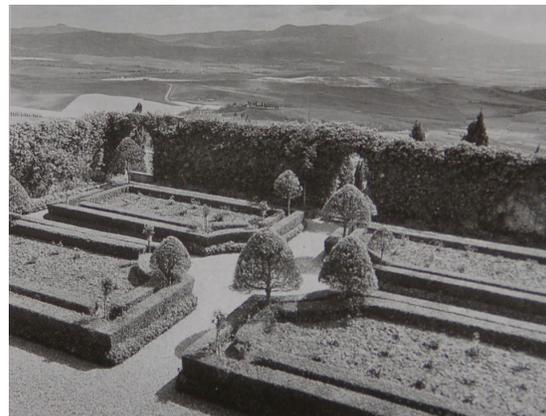


Figura 11 - Palácio Piccolomi (Fonte: OSMUNDSON, 1999)

Entre os anos de 1458 a 1464, algumas obras também foram feitas com terraços-jardins, como o palácio Piccolomini, em Pienza, Itália, um dos mais preservados da época renascentista.

Em Moscou, na Rússia, o palácio do Kremlin, construído para a nobreza, possui um terraço-jardim de 4 hectares no mesmo nível da mansão com jardins e fontes. O palácio original foi construído em 1773, como mostra o projeto na figura.

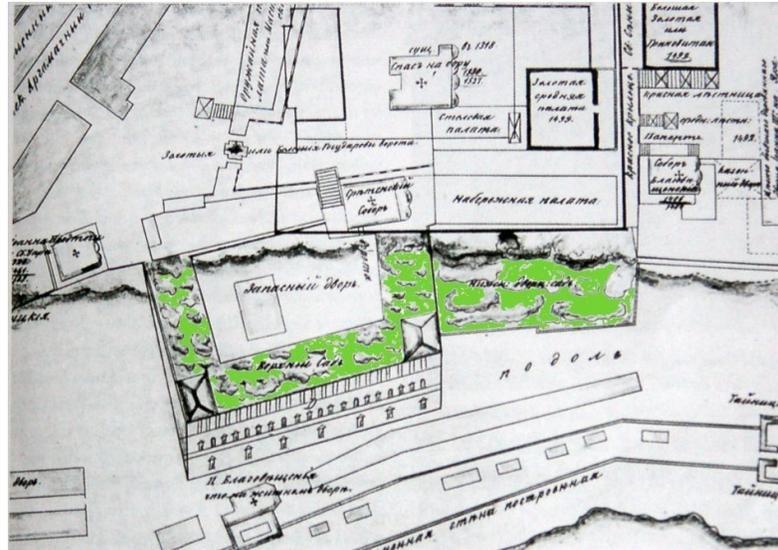


Figura 12 - Palácio de Kremlin em Moscou (Adaptação: OSMUNDSON, 1999)

Já no século XIX, com o desenvolvimento do concreto como material para coberturas, construíram-se lajes planas na Europa e na América. Como exemplo dessa construção, tem-se, em 1868, no *World Exhibition* em Paris, o *nature roof* (concreto plantado).

No século XX, com o movimento moderno, o concreto armado se tornou um material largamente utilizado em toda estrutura. O arquiteto Frank Lloyd Wright projetou o *Midway Gardens*, um restaurante com cobertura ajardinada em Chicago, 1914, hoje demolido.



Figura 13 – Terraço da *Villa Savoye*, construída em 1928 (GALINSKY, 2008)

O arquiteto franco-suíço Le Corbusier foi o primeiro a utilizar sistematicamente terraços-jardins em projetos para clientes mais abastados, de acordo com os "cinco pontos da arquitetura nova" propostos por ele:

- **planta livre:** através de uma estrutura independente permite a livre locação das paredes, já que essas não mais precisam exercer a função estrutural;
- **fachada livre:** resulta igualmente da independência da estrutura. Assim, a fachada pode ser projetada sem impedimentos;
- **pilotis:** sistema de pilares que elevam o prédio do chão, permitindo o trânsito por debaixo do mesmo;
- **terraço-jardim:** "recupera" o solo ocupado pelo prédio, "transferindo-o" para cima do prédio na forma de um jardim;
- **janelas em fita:** possibilitadas pela fachada livre, permitem uma relação desimpedida com a paisagem.

Esses cinco pontos que constituíam os grandes parâmetros da arquitetura de Le Corbusier, mais tarde, deixaram de ser associados a ele e se tornaram os cânones da chamada arquitetura moderna.

Somente na segunda metade do século XX, construíram-se grandes áreas plantadas, cobrindo estacionamentos, estações de metrô e avenidas subterrâneas; porém, não foram classificadas como coberturas vegetais.

Os telhados vegetais contemporâneos tiveram o início do seu desenvolvimento em países de língua alemã. Isso aconteceu pela combinação da pressão de grupos ecologistas com o aumento da produção científica nas áreas de construção e sócio-ambientais. A criação de um grupo de estudos em 1977 na Alemanha, chamado FLL (*Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau*) – Sociedade de Estudos para o Desenvolvimento da Paisagem e Paisagem Construída – contribuiu para a implementação de técnicas construtivas que diminuíssem o impacto ambiental.

Segundo Dunnet e Kingsbury (2004), o início dos estudos de coberturas vegetais na Alemanha foi através do uso de camadas de pedras sobre coberturas planas, como proteção aos raios-ultravioletas nas impermeabilizações. Começou o crescimento de plantas espontaneamente, através do acúmulo de substâncias contidas na água, tornando-se uma fonte de alimentação vegetal.

Nas décadas de 1960 e 70, na Alemanha e Suíça, desenvolveram-se projetos com coberturas vegetais em construções escalonadas de modo a adequar-se à topografia, como o caso da *Terrassenhäuser*, Figura 14:

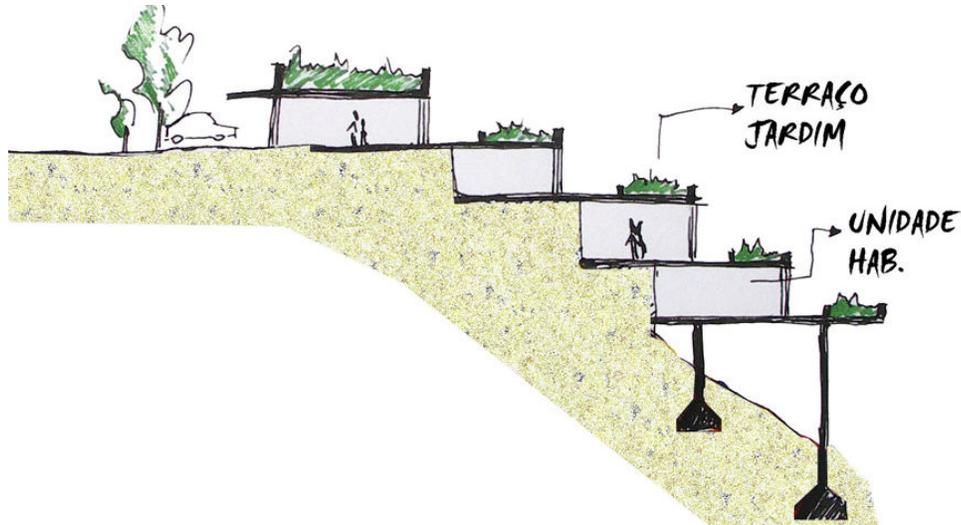


Figura 14 – Corte esquemático de um Terrassenhäuser, muito comum em condomínios

O arquiteto austríaco Friedensreich Hundertwasser construiu a casa Hundertwasser, que se tornou o mais influente telhado vegetal em Vienna, como ilustra a Figura 15. Utilizaram aproximadamente 900t de solo e 250 plantas entre árvores e arbustos.

No Brasil, principalmente sob a influência das idéias modernistas de Le Corbuseir, construiu-se o Ministério da Educação e Saúde, entre 1936-43, ilustrado na Figura 16. O jardim da cobertura foi uma das primeiras obras realizadas por Roberto Burle Marx, em 1938. Já o projeto arquitetônico foi elaborado por Lúcio Costa, Affonso Reidy, Jorge Moreira, Carlos Leão, Ernani Vasconcellos e Oscar Niemeyer, baseados em oficinas ministradas por Le Corbusier e em alguns esboços feitos durante a sua estadia no Brasil em 1936 (BRUAND, 1984).



Figura 15 – Casa Hundertwasser (Fonte: MARK HARDEN'S ARTCHIVE, 2006)



Figura 16 – Antigo Ministério da Educação e Saúde (Fonte: LOIPETSBERGER, 2005)

Hoje existem algumas companhias espalhadas pelo mundo, as principais delas localizadas na Alemanha, trabalhando com uma variedade de soluções para coberturas vegetais. No Brasil, existe uma empresa especializada em coberturas vegetais chamada Ecotelhado®. Sua técnica consiste na montagem de um telhado convencional composto por telhas de fibras vegetais, com a posterior colocação de compartimentos feitos de alumínio em módulos já plantados e colocados sobre o telhado, como ilustração da Figura 17. Essa técnica substitui a impermeabilização com mantas pelo telhamento. A vantagem é a facilidade de substituição dos módulos; contudo, os módulos distribuem a maior parte das cargas no beiral, necessitando de um especial cuidado nessa estrutura.



Figura 17 – Montagem da Ecotelha (Fonte: ECOTELHADO, 2006)

Atualmente existem alguns exemplos construídos no Estado de Santa Catarina, sendo um dos mais expressivos um hotel fazenda localizado em Bom Retiro, com aproximadamente 600m² de cobertura vegetal inclinada, como mostra a Figura 18.



Figura 18 – Hotel fazenda em Bom Retiro, SC

Anexo à edificação do hotel, existem outras edificações pertencentes à sua estrutura, todas com coberturas vegetais e um condomínio rural, onde somente é permitido esse sistema de cobertura nas edificações.

A construção contou com consultoria de Gernot Minke, arquiteto alemão e professor da Universidade de Kassel, com largo conhecimento na área da

bioconstrução. De acordo com Rosa (2005), a cobertura teve problemas relacionados à morte do gramado, tornando-se indispensável a irrigação constante durante períodos de seca, mostrando a necessidade de estudos prévios sobre a aplicação dessas coberturas.

Essa solução de cobertura tornou-se uma técnica bastante utilizada nas chamadas ecovilas, que vêm se espalhando pelo país. Suas técnicas ainda são bastante rudimentares, demonstrando necessidade de estudo aprofundado dos seus componentes para uma melhor adaptação no país, considerando as particularidades de cada região.

2.2. DEFINIÇÕES

Para o desenvolvimento do trabalho, buscou-se estabelecer algumas definições necessárias para o entendimento. Os conceitos estão descritos abaixo.

a) **Desempenho** – Segundo o projeto de norma de desempenho de edifícios habitacionais de até 5 pavimentos, é o “comportamento em uso de um produto”.

O desempenho de cobertura vegetal corresponde ao comportamento do telhado, através da discriminação técnica, projeto, construção e durabilidade ao longo de sua vida útil. Para o bom desempenho, a cobertura deve atender às necessidades a que ela se propõe tanto de proteção quanto de conforto ambiental.

b) **Sistema Construtivo** – Segundo Tacla (1984), define-se sistema construtivo como “o conjunto das regras práticas, ou o resultado de sua aplicação, de uso adequado de materiais e de mão-de-obra que se associam e se coordenam para a concretização de espaços previamente programados.

Do grego, a palavra *systema* significa combinar, ajustar e formar um conjunto. O que implica um conjunto de elementos, idéias, ou partes ligadas entre si, cumprindo sua função, podendo cada um influir, ou até determinar, o funcionamento do todo.

Conseqüentemente, Sistema Construtivo é o conjunto dos elementos, ou de vários outros subsistemas que, associados, formam o todo. Esses vários subsistemas são interdependentes, formados por componentes e organizados de modo a cumprir os requisitos e critérios funcionais e construtivos da edificação.

c) **Classificação das coberturas vegetais** – De acordo com Trebilcock (1998), as coberturas vegetais são classificadas, de acordo com a vegetação, em

extensiva e intensiva (que alguns autores subdividem em semi-intensiva e intensiva). A extensiva é composta normalmente de plantas resistentes e, na sua maioria, rasteiras, não precisando de manutenções periódicas. Já a intensiva, construída como um jardim no topo dos edifícios, é uma área de recreação e utiliza várias espécies de plantas, canteiros e até mesmo pequenos lagos.

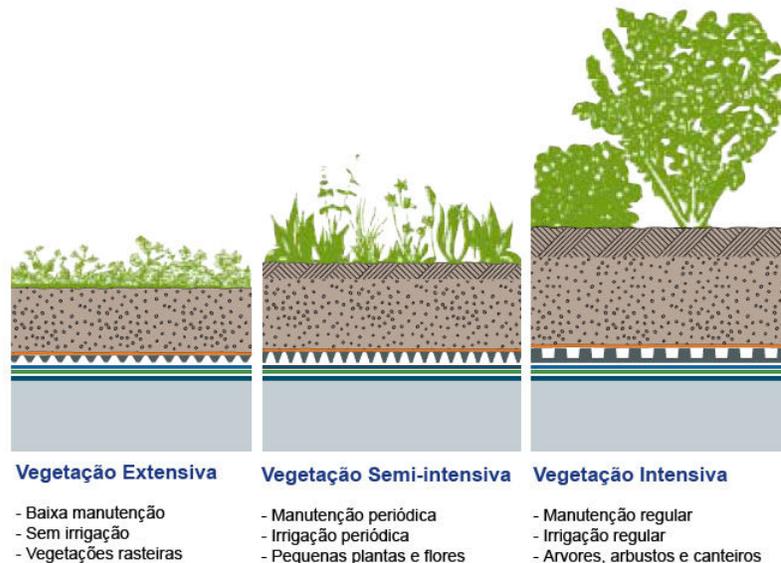


Figura 19 – Comparação entre as classificações de coberturas vegetais e considerações a respeito delas (Adaptação: ZinCo, 2007)

Na Figura 19, pode-se observar algumas diferenças nas classificações de vegetações utilizadas em coberturas. O tamanho de cada vegetação define a espessura da camada de substrato e, conseqüentemente, a capacidade que a estrutura deve suportar.

2.3. EVAPOTRANSPIRAÇÃO

Praticamente, toda a água de que as plantas necessitam é extraída pelo sistema radicular e perdida para a atmosfera por meio do processo de evapotranspiração. Essa palavra é composta pela união de outras duas, evaporação e transpiração, que significam, respectivamente:

a) **evaporação** – perda de água contida no solo, ou na superfície da planta, para a atmosfera. Essa água é interceptada por folhas, galhos e tronco das árvores, além da liteira¹ e camadas de húmus. O processo de interceptação de água ocorre

¹ Fonte de matéria orgânica vegetal.

acima da superfície mineral. A água é retida pelos tecidos vivos e não vivos de plantas. Assim, o que é perdido pelo dossel² é a quantidade diretamente evaporada.

b) **transpiração** – processo passivo dito em condições químicas potenciais de evaporação através dos estômatos³. A energia radiante e sensível provoca a vaporização de camadas finas de água em torno das células do parênquima, provocando a difusão do vapor através dos estômatos e transportando o vapor para longe pela turbulência. A perda de água cria um déficit hídrico nas células, implicando em potenciais negativos no xilema, cuja ordem de grandeza é muito superior ao gravitacional, possibilitando a sucção da água do solo através das raízes. A força motora do movimento são os potenciais hídricos muito baixos que se desenvolvem no ar não saturado na circunvizinhança das folhas. Mesmo sendo um processo físico, a transpiração é o único componente da evapotranspiração sob controle fisiológico.

A soma total da água evaporada depois de passar pelas plantas com a água proveniente da sua transpiração é chamada de evapotranspiração. Assim, a evapotranspiração consiste no processo no qual a vegetação e o solo enviam para a atmosfera vapor de água, aumentando a umidade do ar.

Esses dois processos dependem de energia solar, pois a água, retida no vegetal e no solo, faz com que ocorram evaporação e transpiração, prevenindo que a energia radiante se transforme em calor nas superfícies. Portanto, a qualidade climática na área urbana depende da quantidade de espaços com vegetais em relação à área total, vegetal e construída.

2.4. RETENÇÃO DE ÁGUA

Segundo Tucci (2001), existem diversos modos para diminuição dos riscos de enchentes, como infiltração, armazenamento de água e retardamento do escoamento das águas. Dentre esses modos, as estratégias podem ser de planos de infiltração, valos de infiltração, bacias de percolação, dispositivos hidráulicos de percolação e pavimentos permeáveis. Os dispositivos para criar esses ambientes e suas respectivas descrições são apresentados na Tabela 1.

² Estrato superior da formação vegetal, ou seja, a camada de folhagem.

³ São elementos de vital importância na transpiração e trocas gasosas das plantas, podem ser classificados em vários tipos de acordo com o arranjo de suas células.

Tabela 1 – Estratégias para infiltração, armazenamento e retardamento do escoamento de águas pluviais

	
<p>Plano de infiltração - dispositivos colocados no lote, que recebe as águas pluviais provenientes de uma área impermeável como uma edificação.</p>	<p>Valos de infiltração, colocados paralelos a estradas, concentrando os fluxos das áreas adjacentes de águas pluviais.</p>
	
<p>Canteiros permeáveis, adjacentes às calçadas.</p>	<p>Meio-fio permeável, adjacentes às ruas.</p>
	
<p>Pavimento permeável em passeios, estacionamentos e ruas com pouco tráfego.</p>	<p>Coberturas vegetais no topo dos edifícios, com capacidade de armazenar a água e, também de retardar o escoamento das águas pluviais.</p>

Araújo *et al* (2000) realizaram experimentos de escoamento de água em diferentes superfícies e materiais, com o objetivo de determinar seu coeficiente de

escoamento através da simulação de chuvas com uma intensidade de 110mm/h. Os resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Diferentes superfícies e seu respectivo coeficiente de escoamento (ARAÚJO *et al*, 2000)

Superfície	C
Solo compactado	0,66
Concreto	0,95
Bloco de concreto	0,78
Paralelepípedo	0,60
Bloco vazado	0,03
Concreto permeável	0,03

Assim, de acordo com a Tabela 1, a cobertura vegetal de um edifício classifica-se como estratégia no lote, transferindo a área permeável, que é característica de um terreno com vegetação, para o topo da edificação, contribuindo para aumentar a absorção de água pluvial.

A cobertura vegetal, além de auxiliar na diminuição da temperatura urbana, quando usada em larga escala, pode diminuir os efeitos causados pelos alagamentos nas cidades, principalmente em países de clima tropical, onde ocorrem chuvas intensas. Isso ocorre, pois a vegetação tem capacidade de absorver uma parte da água, retardando o tempo de escoamento para a canalização pluvial e evaporando o restante.

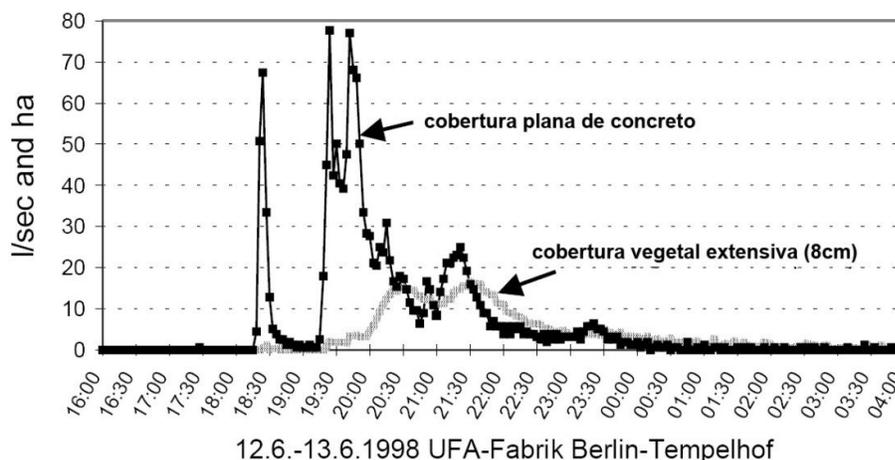


Gráfico 1 – Diferença entre o escoamento de águas em coberturas (Fonte: KÖHLER *et al*, 2001)

O Gráfico 1 mostra a diferença da quantidade de escoamento de água durante um período de 12 horas. Os valores são dados em litros por segundo e obtidos em protótipos com laje e cobertura vegetal com 8 cm de substrato. A Figura

20 mostra um experimento com diferentes sistemas de coberturas, onde equipamentos medem a quantidade armazenada de água por um período de tempo.



Figura 20 - Medições de escoamento para diferentes superfícies (MICHIGAN STATE UNIVERSITY, 2006)

Segundo a norma DIN EN 12.056, parte 2, os coeficientes de deságüe de águas pluviais para coberturas vegetais com camadas de 10 cm de espessura são de 0,3. Ou seja, 70% é armazenada ou evaporada. De acordo com Dürr (1995), uma cobertura com 20 cm de substrato de terra e argila expandida pode armazenar 90mm de água (90 l/m²).

Katzschner (1991), em experimentos realizados em Kassel, Alemanha, relata que uma cobertura com 12º de inclinação e 14 cm de substrato, submetido a 18 horas de chuva intensa apresentou um atraso de 12 horas para o deságüe pluvial, concluindo-se o escoamento 21 horas depois de terminada a chuva.

Em ensaio realizado por Minke (2001) no Instituto do Estado Federado da Baviera, observou-se que uma intensidade de chuva de 20 l/m² em 15 min atuando em uma cobertura com substrato com 10cm de espessura, escoou somente 5 l/m². Já em outro telhado com camada de pedra de mesma espessura, submetido à mesma precipitação, escoou 16 l/m².

Desse modo, as coberturas vegetais mostram uma capacidade de retenção da água, diminuindo as vazões nas redes de drenagem pluvial. Utilizando-se a cobertura vegetal em larga escala, podem-se diminuir os custos da infraestrutura de drenagem urbana, pois esses sistemas são projetados para garantir o escoamento, baseando-se em precipitações máximas. Segundo o estudo hidrológico de Da Cunha (2004), a cobertura vegetal é capaz de absorver a água pluvial no momento de maior intensidade de chuva, ocasionando um retardo no escoamento para a rede pública em até 14mm de chuva, diminuindo conseqüentemente a vazão de pico na rede de drenagem.

2.5. POTENCIALIDADES DAS COBERTURAS VEGETAIS

Na região de Florianópolis, de clima quente e úmido, a cobertura vegetal coloca-se como uma opção viável diante dos altos níveis pluviométricos e de evapotranspiração. De acordo com Dunnet e Kingsbury (2004), as vantagens das coberturas vegetais podem ser classificadas em três grandes áreas.

a) Aspectos de percepção

Nos topos de edifícios da cidade, nota-se a despreocupação com as superfícies dos telhados. Muitas vezes enegrecidos pelo tempo, com a ação da água e poluição, as coberturas são locais de baixa manutenção e, em muitos casos, servem de depósito de materiais, reservatórios e equipamentos de climatização, sem nenhum tratamento, tornando-se vistas inadequadas para os imóveis mais altos.



Figura 21 – Simulação de coberturas vegetais nas coberturas de Manhattan, Nova Iorque (Adaptação: EARTHPLEDGE, 2007)

Na Figura 21, é apresentada a simulação de uma vista superior dos edifícios de Nova Iorque, onde se substituem as coberturas convencionais, através de programas computacionais, por telhados vegetais. Além de transformar a cidade em um local mais agradável, essas soluções podem contribuir para a diminuição das temperaturas superficiais, melhoria do desempenho térmico das unidades

habitacionais abaixo da cobertura e aumento da absorção e retardamento do escoamento das águas pluviais.

Ulrich (1986) realizou estudos na Alemanha sobre a influência de plantas ou espaços naturais para o auxílio na diminuição do estresse, pressão sanguínea e tensão muscular. Realizou, também, uma análise em hospitais, comparando a recuperação de pacientes com janelas voltadas para locais com vegetações e outros voltados para janelas vizinhas ou poços de iluminação. Os resultados mostram que a recuperação dos pacientes é mais rápida quando voltados para os locais em áreas ajardinadas.

b) Aspectos econômicos

O calor que a cobertura recebe diariamente faz os materiais terem sua durabilidade reduzida. Superfícies horizontais recebem uma parcela considerável da radiação solar incidente no total de uma edificação. Segundo a Tabela 3, os estudos mostram que as temperaturas superficiais são mais elevadas, em torno de 2 ou até 3 vezes, em relação à temperatura ambiente. Com as amplitudes de temperaturas diárias elevadas, variações dimensionais costumam provocar manifestações patológicas, acarretando a desintegração de materiais, delaminação ou descamação de partes dos componentes da cobertura.

Tabela 3 – Estatísticas das temperaturas máximas diárias de acordo com um estudo em Toronto, Canadá, em um período de 660 dias (LIU e BASKARAN, 2003)

Temperaturas	Laje Impermeabilizada		Cobertura vegetal		Ambiente	
	nº de dias	% de dias	nº de dias	% de dias	nº de dias	% de dias
> 30° C	342	52	18	3	63	10
> 40° C	291	44	0	0	0	0
> 50° C	219	33	0	0	0	0
> 60° C	89	13	0	0	0	0
> 70° C	2	0,3	0	0	0	0

O telhado vegetal sobre uma laje impermeabilizada pode melhorar significativamente o desempenho construtivo. Quanto maior for a espessura da camada de vegetação, melhor será o seu desempenho térmico, pois a camada de substrato é responsável pela grande parte da resistência térmica. Porém, devem-se avaliar os custos relacionados à durabilidade e manutenção periódica do vegetal e estrutura de sustentação. De acordo com Peck e Callaghan (1999), para as

coberturas extensivas a necessidade de reparos na impermeabilização é em torno de 15 a 20 anos, enquanto nas intensivas, de 50 anos ou mais.

Com a eficiência térmica de uma cobertura vegetal através do sombreamento, resfriamento evaporativo e a massa térmica, resultantes dos substratos, pode-se diminuir significativamente o custo energético da edificação no verão. Segundo Dunnet e Kingsbury (2004), se o prédio for projetado com essa cobertura, certamente se diminuirá a potência e, conseqüentemente, o tamanho do equipamento de ar condicionado. Assim, para cada redução na temperatura interna de 0,5°C, pode-se reduzir o uso do ar condicionado em até 8%. Isso ocorre pela diminuição do ganho térmico pelo ambiente externo, através da maior resistência térmica. Além disso, as coberturas planas tendem a armazenar água sobre a laje, pois as inclinações para os pontos drenagem, geralmente, têm imperfeições. Já a cobertura vegetal absorve a maior parte da água captada e a água restante será drenada ou armazenada para dias quentes e sem chuvas. Isso aumenta a vida útil da impermeabilização, diminuindo a necessidade de manutenção.

c) Aspectos ambientais

Para cada vegetação, ou conjunto de plantas, que se utiliza numa cobertura vegetal, podem-se criar diferentes *habitats* naturais. Em telhados extensivos, projetados para não ter acesso público, tornam-se locais para a proliferação de plantas, insetos e pássaros. As espécies de planta definem os insetos que habitarão o local e que, por sua vez, definirão os animais, criando uma cadeia alimentar.

Em muitos locais, principalmente em construções mais antigas, pode-se notar o espontâneo crescimento de vegetação, ninhos de pássaros e colônias de insetos. Na Figura 22, é possível observar-se o surgimento de plantas sobre as telhas de barro que acumularam água, criando condições para o desenvolvimento vegetal espontâneo.



Figura 22 – Crescimento da vegetação espontânea

A diferença no escoamento da água pluvial em superfícies duras (concreto e asfalto) e com vegetação é:

- superfícies Duras – a água é levada diretamente para os sistemas de drenagem, tanto dos edifícios quanto urbano, e despejada nos rios. Assim, os rios, que têm seus leitos diminuídos pelo crescimento e impermeabilização do solo urbano, recebem toda a água rapidamente e transbordam, provocando o alagamento;
- solo – uma parte da água é absorvida pelo solo e levada ao lençol freático; outra parte, pela planta que transpira para a atmosfera.



Figura 23 – Esquema, comparando a quantidade de água nas calhas dos telhados. (Fonte: DUNNET e KINGSBURY, 2004)

A cobertura vegetal, como mostrado na Figura 23, absorve e possibilita a evapotranspiração de uma parte significativa da água da chuva, escoando o restante para as calhas do sistema pluvial da edificação. Já em superfícies duras, a água é escoada rapidamente, levando consigo várias partículas depositadas sobre a superfície do telhado, com destino aos sistemas de captação pluvial da edificação e urbano e despejadas nas águas dos rios ou do mar.

Segundo Dunnet e Kingsbury (2004), na cidade de Portland, no Estado de Oregon, EUA, o uso de coberturas vegetais é incentivado para diminuir os impactos causados nos rios, pois uma quantidade de poluentes era levada dos telhados e das ruas, pela chuva, até os rios através da drenagem urbana, prejudicando a produção de salmões neles realizada.

A transferência de área vegetal substituída pela construção, para o seu topo, torna-se uma ótima solução pelas vantagens construtivas e a diminuição dos efeitos citados anteriormente. Em algumas cidades, há incentivos para uma porcentagem ser de área permeável, como o caso pioneiro da cidade de Stuttgart, na Alemanha. Com o apoio de programas municipais de incentivo a coberturas vegetais, no começo de 1980, através de instrumentos, tais como plano diretor, premiações, apoio financeiro e a utilização do sistema em edifícios municipais, determinaram a estabilização de coberturas vegetais no desenvolvimento urbano. Segundo Evert (2004), construíram-se 139.354 m² de coberturas vegetais em Stuttgart, na Alemanha, até o ano de 2004. O programa foi bem sucedido e copiado por várias outras cidades.

A poluição, gerada na cidade por partículas liberadas de veículos automotores e metais pesados contidos na atmosfera, causa danos à saúde da população urbana. As superfícies vegetais além de filtrar essas partículas quando chove, podem também absorver gases poluidores.

Os centros urbanos de maior densidade têm temperaturas maiores em relação às zonas rurais da cidade. Isso ocorre, pois foram substituídas áreas permeáveis com árvores, arbustos e gramados por áreas impermeáveis de asfalto e concreto. Conforme Lötsch (1981), na cidade de Reinbek, as temperaturas do ar no verão foram de 4º a 11ºC mais altas nos centros da cidade em comparação às zonas rurais.

A impermeabilização do solo e o aumento da re-irradiação solar nos centros urbanos aumentam a quantidade de chuvas e, com uma drenagem ruim, majora os riscos de alagamento. Essas chuvas podem, como no caso de São Paulo, ser ácidas pela quantidade de poluição contida na atmosfera. Na região de Florianópolis, as chuvas de verão castigam muitas regiões, principalmente nas encostas de morros, ocorrendo deslizamentos e inundações nas áreas mais baixas. A utilização dessas coberturas em encostas também poderia contribuir para o retardamento das águas pluviais.

De acordo com Silva (2003), as coberturas vegetais, tais como lajes, jardins, coberturas ajardinadas e telhados ecológicos, contribuem para o melhoramento da paisagem urbana pelos valores visuais, recreativos e ambientais. No entanto, essa contribuição somente poderá se maximizar quando a cobertura vegetal estiver inserida na malha urbana, no nível da passagem de pedestres. As coberturas, tratadas neste trabalho, no topo de edificações e muitas vezes fora do contato direto humano, contribuem somente no aspecto ambiental, como, por exemplo, na diminuição de temperatura, na melhoria da drenagem e até mesmo como área de lazer privativa.

Atualmente, a retenção de água é um dos temas em que se concentra a maior quantidade de estudos, através de análises comparativas entre diferentes materiais e sistemas de coberturas.

Na pesquisa efetuada na cidade de São Carlos, São Paulo, Morais (2004) compara medições de temperatura no interior de uma edificação de 5,23x3,60m, com 2,21m de altura, dividida ao meio, sendo a metade com cobertura vegetal de 22cm de substrato e uma cobertura em laje impermeabilizada. Nos resultados, as

maiores diferenças entre as medições de temperatura do ar realizadas no interior dos ambientes foram de 1,2°C no inverno e 3,8°C no verão. O período de medição foi: 05 a 12 de julho como situação de inverno e de 15 a 22 de outubro como situação de verão.



Figura 24 – Edificação para medições em São Carlos (MORAIS, 2004)



Figura 25 – Protótipos construídos na USP (VECCHIA *et all*, 2006)

Tabela 4 – Temperaturas internas do ar (tbs) nos sistemas de cobertura (Fonte: VECCHIA, 2005)

	tbs (°C) cerâmica	tbs (°C) aço galvanizado	tbs (°C) fibrocimento ondulada 6mm	tbs (°C) laje concreto	tbs (°C) cob leve verde	temp ar ext (°C)
Máxima	30.4	45.0	31.0	34.7	28.8	34.0
Média	24.1	26.5	24.5	27.1	22.4	27.2
Mínima	15.2	11.5	14.4	14.8	16.2	12.7
A (Amplitude térmica)	15.2	33.4	16.5	19.9	12.6	21.4

Já no estudo de Vecchia (2005), realizado na Escola de Engenharia de São Carlos, USP, foram construídos cinco protótipos de 2,7x2,2m e altura de 2,9m, diferenciando apenas os sistemas de cobertura para avaliação térmica simultânea e comparativa. Os protótipos foram construídos com tijolos maciços, incluindo porta e janela. As coberturas utilizadas foram de aço galvanizado, fibrocimento de 6mm, laje de concreto impermeabilizada, cobertura com telhas de barro e cobertura vegetal com 10cm de espessura. Os resultados de desempenho térmico da Tabela 4, no período de 4 a 10 de outubro de 2004, demonstram que a cobertura vegetal tem uma amplitude térmica menor entre os sistemas propostos no estudo.

2.6. FLUXO DE CALOR DA COBERTURA VEGETAL

Os fluxos de calor das coberturas vegetais dependem dos materiais empregados e da cor do mesmo. Na Figura 26, pode-se notar a diferença entre o fluxo de calor de uma laje impermeabilizada e uma cobertura vegetal extensiva. Com a radiação global de 5.354W/h nos dois modelos o calor latente⁴ na laje é muito superior ao da cobertura vegetal, com diferença de aproximadamente 1.000W/h. Essa diferença é obtida através do fenômeno de resfriamento por evapotranspiração do vegetal (ver item 2.3).

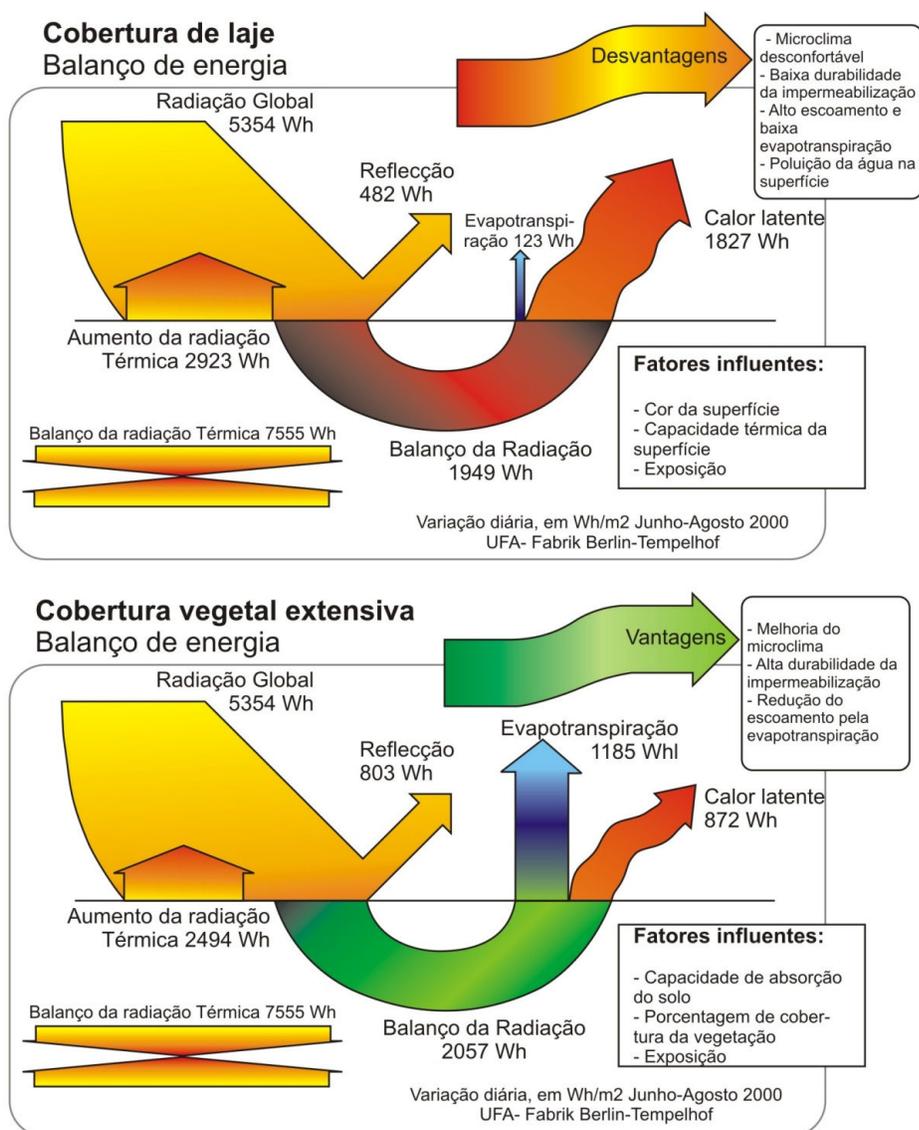


Figura 26 – Diferença de fluxo de calor entre uma laje e uma cobertura vegetal (SCHMIDT, 2002)

⁴ É a quantidade de calor que uma unidade de massa de determinada substância deve receber para mudar de estado físico.

Para efeito de isolamento térmico, podem-se considerar os seguintes itens da cobertura vegetal em uma edificação:

- a) através do colchão de ar formado pela vegetação que, quanto mais denso e espesso, maior é;
- b) uma parte de radiação calórica de onda longa emitida pelo edifício é refletida pela folha do vegetal e outra parte absorvida, diminuindo a perda de radiação de calor do edifício;
- c) a densa vegetação impede que o vento chegue à superfície do substrato. Sem a movimentação de ar, a perda de calor por convecção (efeito do vento) é quase nula, diminuindo o consumo de energia;
- d) quando a temperatura do exterior é mais baixa, geralmente de manhã, a perda de calor da parte de dentro para a parte de fora é maior, formando-se orvalho na vegetação. Conforme Minke (2004), essa formação aumenta a temperatura, pois na condensação de 1g de água, libera-se 2217J de calor.

As diferenças entre vegetações para a melhoria do isolamento térmico são bastante significativas e dependem muito da espécie de vegetal. De acordo com um estudo desenvolvido pelo laboratório de Investigação de Construção Experimental da Universidade de Kassel, Alemanha, os vegetais que formam pastos são os melhores por terem um índice de área de folha verde por metro quadrado de cobertura maior, seguindo os valores da Tabela 5.

Tabela 5 – Superfícies de folhas por metro quadrado (fonte: MINKE, 2004)

Superfície de folha de diferentes espécies de vegetação	
Vegetação estudada	Superfície de folha c/ m ² de superfície de solo ou de muro
Gramado: 3 cm de altura	6 m ²
5 cm de altura	9 m ²
PRADERA com pastos de 60 cm de altura	Até 225 m ²
Teto de pasto no verão	Mais 100 m ²
Sedum até 8 cm de altura	1 m ²
Sedum muito denso até 10 cm de altura	2,4 m ²
VID SILVESTRE em fachada:	
10 cm de espessura	3 m ²
20 cm de espessura	5 m ²
Hera em fachada de 25 cm de espessura	11,8 m ²

Del Barrio (1998) apresenta um modelo matemático para o comportamento térmico de um telhado vegetal. Levando em consideração parâmetros, como o índice de área de folha (chamado LAI – *Leaf Area Index*) e sua

característica geométrica, a densidade aparente do solo, sua espessura e a composição da mistura, chega à conclusão de que a propriedade da cobertura vegetal é de isolamento térmico e não de resfriamento, reduzindo o fluxo de calor. Segundo Morais (2004), o programa Jardim 1.0, utiliza o índice de área foliar. Esse programa estima as temperaturas superficiais da vegetação com base no modelo proposto por Penman-Monteith para o cálculo da evaporação da água em superfícies ao ar livre, segundo a equação abaixo:

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

A equação é uma combinação dos estudos de Penman e Monteith. Penman desenvolveu, em 1948, uma equação que calcula a evaporação da água em superfícies ao ar livre segundo registros climatológicos padronizados como radiação solar, temperatura do ar, umidade relativa e velocidade do vento. Monteith inclui na equação fatores como resistência aerodinâmica e resistência ao fluxo de vapor pela folha.

A carga de ventos, bem como a quantidade de radiação solar, também age, sobretudo, na evaporação e têm influência na espécie de planta a ser usada. Com maior altura da edificação, maior será a ação de ventos e, com isso, a evaporação de água das plantas. Também para coberturas inclinadas, voltadas para orientações com maior radiação solar, o solo secará mais rapidamente, necessitando de diferentes espécies de plantas resistentes a essa característica.

Com menores temperaturas de superfície, diminuem-se os redemoinhos de vento comumente causados em coberturas de laje. Esses redemoinhos são responsáveis pelo aumento da poluição do ar, retirando a fuligem depositada na cobertura, retornando-a novamente para a atmosfera.

2.7. POLUIÇÃO SONORA

A poluição sonora é caracterizada pela emissão de ruídos em limites perturbadores da comodidade auditiva, exceto das fontes naturais de emissão de ruído que geralmente não causam poluição sonora, dado seu caráter intermitente ou ocasional. Já as fontes artificiais são geralmente as causadoras de poluição sonora, como ocorre com as emanações provenientes das atividades humanas nas

aglomerações urbanas, porque é pela intensidade e ininterruptão do barulho que é causado o dano ao ouvido humano. Enfim, a poluição sonora ocorre quando, além de intenso o ruído, é ele também ininterrupto, constante e freqüente, com o que o ouvido humano dificilmente se acostumará.

As plantas podem contribuir para a redução do ruído mediante reflexão, deflexão (dispersão) e absorção sonora, transformando a energia sonora em energia calorífica ou de movimento. Normalmente, as coberturas vegetais reduzem o som, nas ondas de alta freqüência, que são consideradas mais incômodas ao ouvido humano.

De acordo com os estudos de Minke (2001), 12cm de solo podem reduzir a intensidade acústica em 40dBA, já 20cm de solo reduz entre 46-50dBA. A análise desconsiderou a camada de vegetal, podendo ainda contribuir para a redução.

A contribuição de áreas vegetais para reduzir a poluição sonora urbana nas cidades é melhor se presente no nível da superfície, como o caso de parques e jardins. Porém, como citado no final do item 2.5, não é descartado o uso de vegetais em coberturas, adicionando-se essas às áreas verdes da cidade e aumentando os benefícios já citados.

2.8. PREVENÇÃO DE INCÊNDIO E RISCOS

A vegetação pode ajudar na diminuição do alastramento do fogo, principalmente nas situações em que o solo estiver saturado. Também se sabe que se a vegetação estiver seca, teremos o efeito totalmente inverso, sendo combustível para o alastramento do fogo. Como solução, Dunnet e Kingsbury (2004) sugere a utilização de caminhos de pedra ou cimento, funcionando como uma espécie de barreira no perímetro de toda cobertura. Também existem vegetais com capacidade de acúmulo de água no seu interior, como o caso das plantas do gênero *sedum* e até a colocação de *sprinklers* por toda a cobertura, funcionando como irrigação e sistema anti-incêndio.

Nos telhados vegetais extensivos, contudo, o alastramento do fogo não é um problema em potencial, pois as plantas, na sua maioria, são rasteiras, oferecendo pouco combustível ao fogo.

3. PROJETO DE COBERTURAS VEGETAIS

A cobertura vegetal é um espaço gerado pela adição de camadas de solo e plantas nas coberturas das edificações. Para se construir essa cobertura, devem-se levar em consideração vários fatores que influenciam no seu bom desempenho, tais como a estrutura de apoio, a região em que se localiza e a espécie de vegetação.

Neste trabalho, o foco são os telhados vegetais extensivos, com uma pequena espessura de camada do solo e plantas especializadas. As características descritas neste capítulo valem tanto para soluções de pequena ou grande escala, desde que atendam aos requisitos de estanqueidade, durabilidade e baixa manutenibilidade.

3.1. CONSIDERAÇÕES ESTRUTURAIS

As diferentes categorias de coberturas vegetais, extensivas e intensivas, não são caracterizadas somente no âmbito vegetal, como as diferentes espécies e seus respectivos portes, mas também pela diferença da camada de substrato que a planta necessitará, requerendo menor ou maior espessura. Segundo Dunnet e Kingsbury (2004), para projetos de coberturas vegetais, os pesos a serem considerados num pré-dimensionamento são de 70 e 170 kg/m para coberturas extensivas, de 15 a 25cm de substrato. Valores acima desses valores consideram-se intensivas, com pesos maiores que 170 kg/m².

Cada país define, em suas instruções normativas, as cargas em coberturas, levando em consideração acessos de manutenção, peso do cobrimento de neve ou água da chuva e ventos, conforme Tabela 6 e Tabela 7.

Tabela 6 – Peso de materiais para substrato (Adaptação: ABNT e DUNNET e KINGSBURY, 2004)

Material para substrato	(kg/m ³)	Material para substrato	(kg/m ³)
Brita ou seixo	1000-1500	Água	1000
Pedra pomes	650	Pedra vulcânica (escória)	800
Cerâmica (barro)	1000-2000	Perlita	500
Areia seca	1500	Vermiculita	100
Terra argilosa seca	1700-2000	Argila Expandida	< 400

Tabela 7 – Peso de materiais da construção civil (Adaptação: ABNT)

Material	(kg/m ³)		(kg/m ³)
Granito	2300-3000	Lã de vidro	10-100
Mármore/calcáreos	> 2600	Poliestireno expandido moldado	15-35
Ardósia, xisto	2000-2800	Membranas betuminosas	1000-1100
Basalto	2700-3000	Policloreto de vinila (PVC)	1200-1400
Concreto normal	2200-2400	Madeira (densidade elevada)	800-1000
Concreto leve	400-1600	Madeira (densidade baixa)	570
Argamassa comum	1800-2100	Alumínio	2700
Placas fibro-cimento	1800-2700	Aço, ferro fundido	7800

Para se determinar o peso de uma cobertura vegetal, deve-se observar principalmente a camada do solo, responsável pela maior influência no peso total que, dependendo da classificação do telhado, pode indicar a espessura desejada. Considera-se o peso saturado para definir a carga atuante na estrutura da edificação e o peso insaturado para verificação das forças de sucção atuantes na estrutura de cobertura.

3.2. CONSIDERAÇÕES EM TELHADOS INCLINADOS COM VEGETAÇÃO

Um dos principais problemas associados à inclinação dos telhados com vegetação é o acúmulo de substrato para as partes mais baixas do telhado e a perda de substrato da cumeeira e espigões, podendo acarretar na morte dos vegetais. Esse escorregamento acontece pela falta de aderência, causada pela própria inclinação, sendo necessários dispositivos para assegurar a rugosidade ou apoio ao substrato.

Minke (2001) descreve a utilização de coberturas vegetais na Alemanha com até 40° (84%) de inclinação. Na Figura 27, podem-se observar os telhados do condomínio com inclinações elevadas e sem problemas relacionados à perda de substratos ou morte das espécies na região da cumeeira.



Figura 27 – Condomínio em Dössel, Alemanha, com coberturas verdes. Projeto dos arquitetos Bookhoff e Rentrop (Fonte: MINKE, 2001)

Quando não existe a determinação das forças de cisalhamento, atuantes entre as camadas de substrato e membranas anti-raiz, Dunnet e Kingsbury (2004) sugere uma inclinação máxima de 17% ou 9,5°. Utilizando-se de barreiras horizontais, com montagem de canteiros (*containers*) ou com o plantio de mantas de vegetação, constrói-se em até 40° de inclinação.

3.3. AÇÃO DE VENTOS EM COBERTURAS

Os fenômenos relacionados à ação de ventos, já conhecida nos telhados convencionais, são definidos pela NBR 06.123 - Forças devidas a vento em edificações. As estruturas de telhados são submetidas à ação dos ventos, principalmente pelos efeitos de sucção e sobrepessão, variando de acordo com a localização na superfície dos telhados, sendo pequena no centro e grande próximo aos cantos e das linhas perimetrais.

Nas coberturas vegetais, a ação dos ventos atua de modo similar, porém os resultados têm outras características. A rugosidade da superfície e a possibilidade de passagem de ar por entre a capa de plantas provocam a diminuição da pressão entre a parte superior e a inferior da vegetação, diminuindo consideravelmente o efeito de sucção dos ventos. Também o entrançamento das raízes distribui as forças uniformemente para toda a cobertura, ao contrário do que acontece em coberturas com telhamento. Minke (2004) destaca que as normas definidas pela Associação Alemã de Jardinagem em Telhados em edificações com

até 8 m de altura, as pressões variam entre 0,4 kN/m² nas áreas centrais e 0,8 kN/m² nas perimetrais. Já em telhados de 8 m a 20 m de altura, as pressões são de 0,65 kN/m² e 1,3 kN/m². Para se caracterizar como zona perimetral de uma cobertura, considera-se 1/8 da largura do telhado, com o mínimo de 1 m e máximo de 2 m.

Também, segundo Minke (2004), a ação de ventos atuantes em coberturas demonstrou que um telhado com camadas de pedras nas partes perimetrais do telhado são submetidas à sucção com os ventos e que a mesma cobertura vegetal com 15 cm de substrato não apresenta tensões significativas.

A ação dos ventos, mais acentuada em edificações altas, assim como a quantidade de radiação solar, influencia na evaporação da água, e pode definir a espécie de planta a ser usada. Na região de Florianópolis, coberturas orientadas ao Norte apresentarão estas duas características, pois o vento predominante e a maior quantidade de radiação solar são oriundos desse quadrante.

Mesmo com a redução da velocidade dos ventos dada pela superfície rugosa vegetal, Dunnet e Kingsbury (2004) recomenda a colocação de faixas pavimentadas nas regiões perimetrais das coberturas. Com isso, são reduzidos problemas de maior pressão nessas áreas, assim como os danos causados pelas raízes da vegetação nas bordas das membranas de impermeabilização, expostas nas laterais do telhado.

3.4. SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO EM COBERTURAS VEGETAIS

Em coberturas vegetais constituídas por plantas adequadas e substrato, pré-dimensionados para as condições específicas, certamente não haverá necessidade de irrigação periódica. Sempre que possível, deve-se evitar essas iniciativas, bem como a fertilização do solo, além do obtido naturalmente com o depósito de materiais orgânicos.

Havendo necessidade de irrigação, para evitar o desperdício de água tratada, é recomendada a utilização de água reaproveitada da chuva, guardada em cisternas ou até utilizar as águas cinzas de lavatórios e chuveiros, devidamente tratadas e filtradas. Assim se reforça a estratégia bioclimática de Resfriamento Evaporativo, uma opção a ser considerada em locais muito quentes e com poucas chuvas.

Segundo Dunnet e Kingsbury (2004), existem algumas opções de irrigação utilizadas em coberturas vegetais, são elas:

- a) chuveiros automáticos ou *sprinklers* instalados que pulverizam água sobre as plantas. Porém, deve-se evitar a utilização de água tratada;
- b) sistemas de tubulação enterrados que conduzam água no substrato ou por sobre a superfície, também considerando a fonte de água;
- c) sistemas capilares, com a colocação de membranas que absorvam e retenham a água, liberando-a quando o solo necessita. Para esse sistema, a espessura do solo deve ser considerada, a fim de permitir que a raiz da planta consiga obter a água armazenada;
- d) Sistemas de retenção que acumulam água em uma camada abaixo do substrato, abastecidos através da percolação⁵ da água da chuva, conforme citado no item 3.5.3.

3.5. CONSTRUÇÃO DE COBERTURAS VEGETAIS

É possível construir-se coberturas vegetais sobre qualquer sistema estrutural, executados em madeira, perfis e chapas metálicas, concreto, plásticas e com outros compósitos.

Segundo Dunnet e Kingsbury (2004), os modelos contemporâneos de coberturas vegetais construídos são baseados nos desenvolvidos pelos alemães. Companhias como a ZinCo® e a Optigrün®, têm seus sistemas e componentes patenteados, mas a essência utilizada nos modelos é a mesma. Dentre as camadas necessárias há a de impermeabilização, anti-raiz, drenagem, solo e a de vegetação.

No lugar de analisar as diferentes maneiras de construção de uma cobertura vegetal, neste trabalho, descrevem-se subcoberturas necessárias para o bom desempenho construtivo, bem como as suas respectivas características.

⁵ Movimento lento da água através de interstícios, poros ou fissuras de uma substância, sob pressão hidrodinâmica e por ação da gravidade. A percolação transporta também elementos nocivos, como substâncias trazidas ou contidas na água (Fonte: AMBIENTE BRASIL, 2006).

3.5.1. Sistemas de impermeabilização para coberturas

Existem dois grupos de sistemas de impermeabilização, rígida e flexível, apresentados na Tabela 8. Neste trabalho, o foco são as flexíveis, pela facilidade e trababilidade que apresentam em adaptar-se aos diferentes sistemas estruturais de coberturas.

Tabela 8 – Tabela de classificação dos sistemas de impermeabilização

Impermeabilização rígida	Impermeabilização flexível
Argamassa impermeável com aditivo hidrófugo	Mantas asfálticas
Argamassa polimérica	Mantas elastoméricas (Butil, EPDM, etc.)
Cimento modificado com polímero	Geomembranas PVC
Cimento cristalizante para pressão negativa e bloqueadores hidráulicos	Geomembranas de PEAD
Membranas de epóxi	

Dentre os sistemas flexíveis, existem as membranas asfálticas, acrílicas, membrana à base de elastômeros, membranas poliuretânicas.

A impermeabilização é uma das principais camadas necessárias em telhados vegetais. É importante, na discriminação para projetos, observar a sua efetividade e durabilidade. No mercado brasileiro, existem várias membranas, as mais utilizadas nos sistemas de impermeabilização de coberturas são:

a) **Membranas de Betume-Polímeros** – são constituídas por uma mistura betuminosa modificada por uma resina, plastomérica ou elastomérica.

b) **Membranas Termoplásticas** – as mais conhecidas são as de policloreto de vinila (PVC) plastificado; as de mais recente divulgação são as de poliolefinas (TPO ou FPO).

c) **Membranas Elastoméricas** – podem ser vulcanizadas ou não vulcanizadas. Contam-se entre as membranas vulcanizadas em fábrica as de monômero de etileno-propileno-dieno (EPDM) e as de borracha butílica. Nas não vulcanizadas em fábrica, incluem-se as de poli-isobutileno (PIB) e as de polietileno clorado (CPE). Nessas últimas, poderá ocorrer um processo de cura de características idênticas à vulcanização, após aplicação em obra.

A durabilidade das membranas varia, aproximadamente de 15 a 20 anos, de acordo com as características dos produtos e dos fabricantes. Essa durabilidade pode diminuir através da sensibilidade aos raios ultravioleta e também por serem

suscetíveis às raízes das plantas, pois são materiais orgânicos, com base petrolífica; portanto, torna-se necessário o uso de membranas de proteção anti-raiz. Segundo testes realizados por Pennigsfeld (1981), foi observado que impermeabilizações de betume foram atravessadas por raízes de plantas e que existem microorganismos que vivem nas suas extremidades, dissolvendo materiais de base betuminosa.

As membranas de impermeabilização necessitam de uma camada de proteção para diminuir a deterioração causada pela radiação solar e variações dimensionais oriundas das amplitudes térmicas diárias. Para tal, existem várias soluções como coberturas ventiladas, invertidas e a própria cobertura vegetal, com o objetivo de aumentar sua durabilidade e diminuir custos com manutenção.

3.5.2. Barreira de proteção contra raízes

Como existem membranas de base orgânica na impermeabilização de coberturas que não resistem à propagação das raízes e à atividade de microorganismos, há necessidade de utilização de barreiras, protegendo essa camada. Materiais betuminosos com filmes metálicos em uma das faces, como o caso do alumínio, garantem a propriedade de repelir as raízes. Também existem mantas preparadas com tecidos herbicidas na sua composição, porém a sua durabilidade não é garantida, pois sua estrutura ainda é composta por material orgânico, possibilitando o ataque de raízes em locais fragilizados, como o caso das juntas.

Grande parte das membranas de impermeabilização utilizadas em coberturas vegetais é à base de PVC, com espessuras que variam de 0,8 a 1mm. Esses produtos apresentam elevada durabilidade, eliminando substituições e desperdícios, podendo ser soldados a quente, reduzindo possíveis vazamentos e até mesmo ser reciclado.

Na execução de uma manta de proteção, deve-se cobrir toda a extensão da manta de impermeabilização, incluindo as áreas perimetrais, evitando, assim, problemas com as raízes nos cantos. Deve-se ter especial cuidado com as bordas, já que esses produtos costumam perder seu desempenho quando expostos aos raios solares ultravioleta.

3.5.3. Camada drenante na cobertura vegetal

Através da precipitação, a água pluvial terá vários destinos no ambiente. Um deles é a evaporação diretamente do solo, quando seco e quente, pela superfície da planta, pelas raízes ou até pelas próprias folhas e também de se agregar a partículas e preencher espaços vazios do solo. O excesso irá lentamente para o lençol freático através da percolação.

Na cobertura vegetal, acontece de forma semelhante. A boa drenagem pode servir para estabilização do sistema, separando a parte do substrato da captação de águas. Com a remoção do excesso de água do solo, previne-se sua saturação ou o possível escoamento da água por sobre o substrato, sem sua captação.

Se a drenagem é inadequada, pode comprometer o bom desempenho das membranas impermeabilizantes. O contato com a água, ou solo úmido, faz com que, em coberturas planas, se armazene água, ocorrendo percolação e gerando problemas patológicos na estrutura de suporte. Segundo Peck (1999), coberturas planas sem vegetação são mais suscetíveis a danos, após 5 anos, do que as inclinadas a 5º, pois armazenam água na superfície, no lugar do seu escoamento pelos sistemas de drenagem.

Para coberturas extensivas, espera-se que a vegetação seja durável e com baixa manutenção, tolerante a secas e solos totalmente saturados. Se o substrato permanecer úmido por muito tempo, inibe o crescimento das plantas e o seu enraizamento, deixando-as em condições anaeróbias.

Existem três soluções construtivas comumente utilizadas em camadas drenantes de coberturas vegetais:

a) **materiais granulares** – materiais granulares ásperos, como cascalho, pedriscos, pedaços de pisos cerâmicos e argila expandida, que mantêm espaços de ar entre eles quando colocados juntos formando uma camada. Os poros deixarão a água correr das camadas de terra e vegetação acima, sendo a maneira mais primitiva de obtenção do seu escoamento.

b) **Tecidos porosos** – esses materiais absorvem água, como esponjas, através de sua estrutura, filtrando-a. Uma opção é a reutilização de carpete, tapetes ou roupas, conforme o estudo de Trebilcock (1998). Além da água

proveniente da chuva ou irrigação, esse material também pode absorver a umidade do solo.

c) **Módulos de plástico ou poliestireno** – diferem no desenho conforme cada fabricante, existindo vários modelos para cada peculiaridade do telhado. São bastante resistentes para suportar o peso do solo e da vegetação, sendo somente colocados sobre a superfície da cobertura. Esses elementos possibilitam uma boa drenagem, com pouco peso próprio; eles também armazenam água e são responsáveis pela transpiração de vapor de água pelo solo, conforme Figura 28.

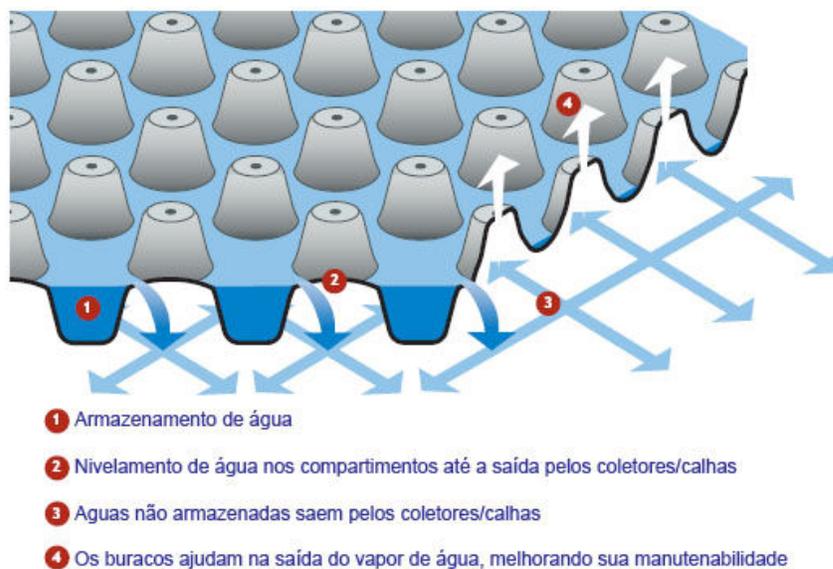


Figura 28 - Esquema do funcionamento dos módulos de plástico (LOHMANN e BARTH, 2006)

Nas coberturas vegetais inclinadas, os regimes de umidade variam de acordo com a altura. No topo, são mais secos que nas partes mais baixas, podendo ser resolvido simplesmente pela diferenciação da espécie vegetal. Onde se localiza a drenagem, deve-se manter a vegetação afastada, para um bom escoamento de água, diminuindo o risco de invasão de raízes e do próprio vegetal que dificulta o escoamento da água.



Figura 29 – Sobreposição da camada filtrante (Fonte: J-DRain GRS, 2006)

Na utilização desses tipos de drenagem é recomendado o uso de membranas filtrantes e tecidos de polipropileno semi-impermeável, colocados sobre a camada drenante, evitando a perda de nutrientes do solo e a obstrução das tubulações e calhas. Deve-se observar a sobreposição entre as emendas das membranas filtrantes, no sentido do declive, por aproximadamente 20 cm, como ilustrado na Figura 29.

3.5.4. Substrato para cobertura vegetal

Para coberturas vegetais extensivas, com pouca manutenibilidade e boa durabilidade, o substrato ideal é a combinação entre a eficiência em absorver e reter água e ao mesmo tempo ter uma boa capacidade drenante. Essa solução pode ser obtida através da mistura de minerais granulares que absorvem água e ao mesmo tempo são porosos para a drenagem.

A leveza do solo é também uma propriedade desejável, reduzindo os custos estruturais da edificação. A porcentagem ideal é entre 30% a 40% de substrato e 60% a 70% de poros, tendo uma boa retenção de umidade e capacidade de aeração nas raízes das plantas.

Solos encontrados em jardins, no geral, não são adequados para coberturas extensivas, por serem muito férteis, fazendo com que as plantas cresçam densamente, diminuindo sua capacidade de regeneração, tornando-as mais suscetíveis às mudanças climáticas. O material orgânico desses solos tendem a oxidar-se, diminuindo o substrato e a capacidade de armazenar a água.

A argila tem uma ótima propriedade de absorção e armazenamento de água, porém seus grãos finos podem formar uma camada impermeável que, quando saturada, dificulta a drenagem do substrato.

A maioria dos substratos comercializados é composta por materiais inorgânicos, cujas propriedades possibilitam o armazenamento de água. Esses solos são produzidos com as características melhoradas, existindo misturas diferentes para cada espécie de vegetal.

De outro modo, os minerais naturais, que incluem areia e rocha ígnea extrusiva, podem ser utilizados como uma alternativa, devendo misturá-los a outros que armazenem água. Materiais artificiais, tais como vermiculita e perlita⁶, facilitam a circulação de água e ar pelo solo. Também existem outras opções, utilizando materiais de construção reciclados como tijolos ou pisos cerâmicos moídos e misturados ao solo.

Tabela 9 – Tabela de materiais para formação do solo de coberturas vegetais (Adaptação: DUNNET e KINGSBURY, 2004)

Materiais	Propriedades
Minerais naturais	
Areia	Textura fina resulta na falta de poros e problemas de saturação do substrato se a drenagem for ruim. Inversamente, a areia grossa pode ser livre de um sistema de drenagem, mas requerer constante irrigação.
Pedra pomes	Leve e de valor, se encontrado no local.
Cascalho (Gravel)	Relativamente pesado
Minerais artificiais	
Perlita	Partículas tendem a se desintegrar com o tempo.
Vermiculita	Muito leve, porém não tem capacidade de armazenar água ou nutriente, podendo se desintegrar com o tempo.
Argila expandida	Leve e têm muitos poros pelo seu tamanho, absorvendo água.
Lã de rocha	Muito leve, porém necessita de muita energia para sua produção e não armazena nutrientes.
Materiais reciclados	
Blocos ou pisos cerâmicos	Estável e uniforme, tendo propriedade de armazenamento. Os blocos usados podem conter argamassa e cimento, aumentando o pH do substrato.
Concreto moído	Retenção de umidade limitada ou disponibilidade de nutrientes, alcalino. Mesmo assim, é barato e disponível em quantidade como material de demolição.
Subsolo	Pesado, baixa fertilidade e disponível facilmente como um subproduto ⁷ da construção.

Os materiais são classificados em três categorias, conforme Tabela 9: naturais, artificiais e reciclados. Pode-se misturá-los de modo a obter um melhor

⁶ Minerais expandidos através do calor, formando grânulos.

⁷ Substância produzida durante a fabricação ou destruição de outra.

desempenho construtivo da cobertura vegetal de acordo com a espécie de vegetal plantada.

3.5.5. Camada vegetal da cobertura

Para a escolha da camada vegetal a ser plantada na cobertura, devem-se considerar quatro fatores: o cobrimento e fixação no menor espaço de tempo; a capacidade de se auto-reparar, cobrindo espaços que morreram ou secaram por exemplo; a capacidade de transpiração e a capacidade de sobreviver às condições climáticas específicas das coberturas.

Laar *et al* (2001) analisaram cinco espécies de plantas, identificando a *Tradescantia pallida* e *Senico confusus* dentre as que apresentaram melhores condições de adequação para o clima do Rio de Janeiro. Köhler *et al* (2003) mostram que as espécies de vegetação mais adequadas para coberturas extensivas são vegetações rasteiras. Ele destaca algumas espécies nativas do Brasil com potencial para a aplicação em coberturas:

<i>A. hybridus</i> , <i>A. spinosus</i>	<i>Digitaria horizontalis</i>	<i>Paspalum maritimum</i>
<i>Acanthospermum australe</i>	<i>Eclipta alba</i>	<i>Phyllanthus corcovadensis</i>
<i>Aeschynomene rudis</i>	<i>Eleusine indica</i>	<i>Polygonum persicaria</i>
<i>Ageratum conyzoides</i>	<i>Emilia sonchifolia</i>	<i>Porophyllum ruderale</i>
<i>Amaranthus deflexus</i>	<i>Erigeron bonariensis</i>	<i>Portulaca olearacea</i>
<i>Ambrosia elatior</i>	<i>Eupatorium pauciflorum</i>	<i>Rhynchelitrum roseum</i>
<i>Artemisia verlotorum</i>	<i>Euphorbia brasiliensis</i>	<i>Richardia brasiliensis</i>
<i>B. plantaginea</i> , <i>B.</i>	<i>Gamaochaeta spicata</i>	<i>S. nigrum</i>
<i>purpuracens</i>	<i>Hyptis suaveolens</i>	<i>S. rhombifolia</i> , <i>S. spinosa</i>
<i>Bidens pilosa</i>	<i>Ipomoea acuminata</i> , <i>I.</i>	<i>Senecio brasiliensis</i>
<i>Borreria alata</i>	<i>Jaegeri hirta</i>	<i>Setaria geniculat</i>
<i>Brachiaria decumbens</i>	<i>L. virginicum</i>	<i>Sida cordifolia</i>
<i>C. ferax</i> , <i>C. rotundus</i>	<i>Leonitis nepetaefolia</i>	<i>Siegesbecija orientalis</i>
<i>Cassia occidentalis</i>	<i>Leonurus sibirica</i>	<i>Silene gallica</i>
<i>Cenchrus echinatus</i>	<i>Lepidium pseudodidymum</i>	<i>Sinapsis arvensis</i>
<i>Chenopodium ambrosoides</i>	<i>Mollugo verticillata</i>	<i>Solanum americanum</i>
<i>Cleome affinis</i>	<i>Mormodica charantia</i>	<i>Sonchus oleraceus</i>
<i>Commelina benghalensis</i>	<i>Oxalis oxyptera</i>	<i>Sorghum halepense</i>
<i>Croton glandulosus</i> ,	<i>P. setosum</i>	<i>Stachys arvensis</i>
<i>Cynodon dactylon</i>	<i>Panicum maximum</i>	<i>Tagetes minuta</i>
<i>Cyperus esculentus</i>	<i>Pannisetum clandestinum</i>	<i>Waltheria indica</i>
<i>D. insularis</i>	<i>Parthenium hysterophorus</i>	<i>Xantium cavanillesi</i>

Normalmente, espécies xerófitas⁸ apresentam maior resistência e podem sobreviver nas condições extremas da cobertura. Assim, a lista de espécies aqui

⁸ Plantas que vivem em regiões com pouca água, adaptada a climas secos.

descritas pode ser ampliada, em função da biodiversidade existente na região sul do Brasil.

Neste trabalho, evitou-se o uso de espécies exóticas. Por essa razão, escolheu-se a gramínea existente na região onde se construíram os protótipos, pela facilidade de transplante e pelo baixo custo.

3.5.6. Sistemas de plantio de coberturas vegetais

A multiplicação das plantas se dá por diferentes processos. Segundo Lorenzi e Souza (1999), os vegetais anuais e bienais se multiplicam exclusivamente por sementes, já os vegetais perenes, por semente, estaquia, alporquia, mergulhia ou divisão de touceiras, dependendo da própria planta ou sua facilidade de multiplicação. Para coberturas vegetais, pode-se utilizar qualquer um desses métodos, dependendo da espécie escolhida.

Segundo Dunnet e Kingsbury (2004), são utilizados quatro métodos para o ajardinamento de coberturas:

a) **multiplicação por sementes ou estacas** – pode-se fazer a semeadura ao ar livre, tendo um substrato composto por 2/3 de terra vegetal e 1/3 de areia fina. Após a semeadura, irriga-se o substrato, cobrindo os sulcos abertos, sendo conveniente a proteção nas horas mais quentes do dia. O substrato deve ser alcalino, com pH entre 8 e 8,5. As desvantagens são os longos períodos para estabilização e desenvolvimento do vegetal, impossibilidade para coberturas com grande inclinação e com grande possibilidade de erosão do solo durante o seu crescimento.

Na multiplicação por estacas, o segmento de um ramo é utilizado para reprodução por meio de enraizamento. São obtidas em ramos herbáceos e lenhosos, cortadas abaixo ou acima de um nó ou gema em bisel⁹. Após essa etapa, colocam-se as estacas diretamente na cobertura, ou em recipientes para posterior plantação.

b) **Transplante de mudas** – as mudas são feitas em estufas através de semeadura ou estacas, como no item acima. Após seu desenvolvimento, a multiplicação na cobertura vegetal se fará pela manhã ou à tarde, precedida de uma

⁹ Corte feito no topo do vegetal, num plano inclinado ao eixo longitudinal.

irrigação. O crescimento normalmente ocorre em bandejas com pequenas profundidades, entre 2,5 e 3,5cm, e seu transplante é menos agressivo, pois planta-se junto com seu pequeno torrão, onde a planta cresceu.



Figura 30 – Mudas em estufas (Fonte: DUNNET e KINGSBURY, 2004)

Essa opção permite um “desenho” mais natural ou artístico da vegetação, sendo mais adequada para coberturas de pequeno porte.

c) **Mantas de vegetação ou leivas** – as leivas de vegetação são comumente utilizadas em jardins. Normalmente é a opção mais econômica e rápida para se ter um gramado. Constituído de torrões de terra e graminéas, só é necessária sua colocação acima de um substrato preparado com 2/3 de areia e 1/3 de terra vegetal, com boa capacidade drenante.



Figura 31 – Manta de vegetação sendo retirada (Fonte: DUNNET e KINGSBURY, 2004)

Já as mantas de vegetação são compostas por vegetais plantados através de sementeira, sobre mantas geotêxteis colocadas no solo, com pouco substrato. As raízes crescerão e buscarão água e nutrientes no solo abaixo formando uma manta vegetal, conforme mostra a Figura 31. Esse método consiste na retirada da camada vegetal, transportado-a em rolos e colocando-a sobre a cobertura com substrato, sendo uma boa opção para coberturas inclinadas. Deve-se virar as arestas da manta para baixo, evitando que o vento a movimente antes da fixação das raízes. O efeito é instantâneo, parecido com uma cobertura vegetal já estabelecida.

d) **Colonização espontânea** – é a opção mais ecológica dentre os métodos de plantação descritos, pois somente crescerão e sobreviverão plantas disponíveis e totalmente adaptadas ao ambiente da cobertura. Essa é a opção de custo mais baixo, sendo necessária somente a colocação de todas as camadas com exceção do vegetal. Também se deve considerar o aspecto compositivo, pois a espécie que crescerá pode não se adequar à composição do edifício. Em telhados inclinados, como na sementeira, pode ocorrer erosão do substrato, sendo assim, essa é uma opção para coberturas planas e com pouca inclinação, inacessíveis e não visíveis.

4. PROJETO E CONSTRUÇÃO DO PROTÓTIPO

O sistema construtivo proposto para os protótipos utiliza o conceito de fôrmas incorporadas com placas cimentícias com madeira mineralizada (PCM), de modo a aliar as vantagens da pré-fabricação com painéis de grande formato e o caráter monolítico do concreto. Com isso, obtém-se rapidez na montagem dos painéis de vedação que, simultaneamente, servem como fôrmas da estrutura, possibilitando a imediata concretagem da estrutura.

As chapas de PCM apresentam boas características de desempenho térmico e acústico. Segundo Barry (2005), em pórticos de parede constituída por placas de PCM com dimensões de 100x260x5cm, argamassadas nos dois lados, têm uma resistência de 36dB, atendendo aos valores da ABNT para fachadas e paredes internas. Quanto ao desempenho térmico, segundo estudo realizado por Güths (2006), com corpo de prova composto por chapas de PCM de 25mm rebocada em uma das faces, totalizando 37mm, o conjunto apresenta 0,242m².K/W para resistência térmica e 0,153W/m.K para condutividade térmica. Já a NBR 15.220 traz valores para aparas de madeira aglomeradas com cimento em fábrica de 2,3 m².K/W para resistência térmica e 0,15W/m.K para condutividade.

A utilização dessas chapas promove um bom desempenho térmico nas paredes, com objetivo de diminuir os ganhos térmicos através das vedações verticais para o interior dos protótipos.

4.1. PROJETO

Seguindo os conceitos de qualidade na construção, o sistema proposto incorpora métodos de produção da indústria da pré-fabricação, sendo um sistema leve e de rápida montagem. As placas cimentícias de madeira mineralizada apresentam facilidade de corte e de fixação, obtendo-se uma ágil montagem. A incorporação das fôrmas possibilita diminuir desperdícios, substituindo a madeira, normalmente descartadas após o uso.

O projeto dos protótipos está ilustrado pelas ilustrações das Figuras 32 à 37 Figura 37, e o detalhamento de todas as peças, utilizadas na construção do protótipo, está no Apêndice A deste trabalho.

4 – Projeto e Construção do Protótipo

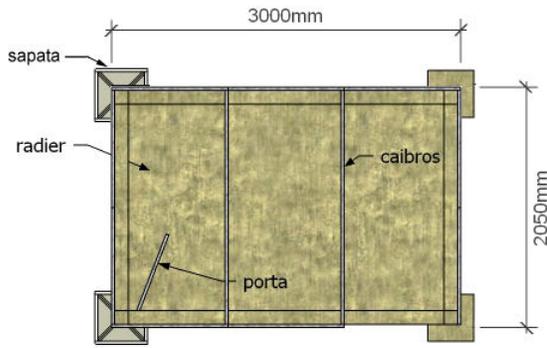


Figura 32 – Planta

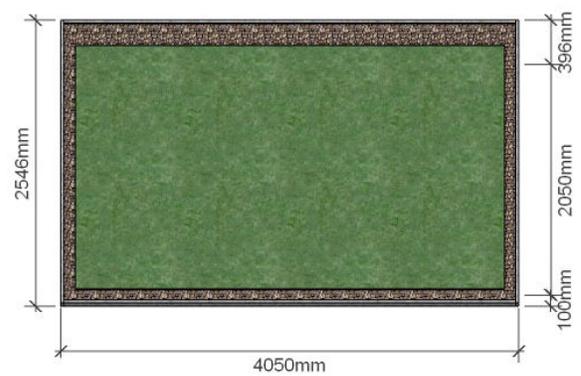


Figura 33 – Vista de topo

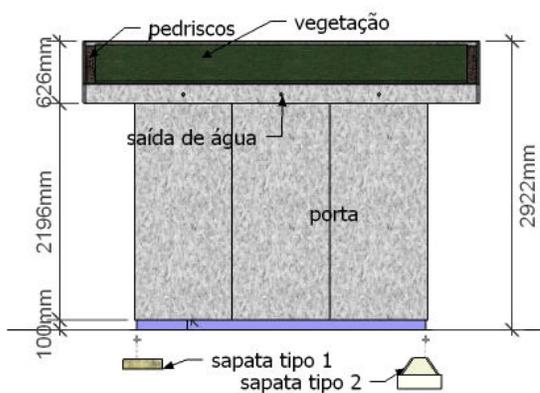


Figura 34 – Vista frontal

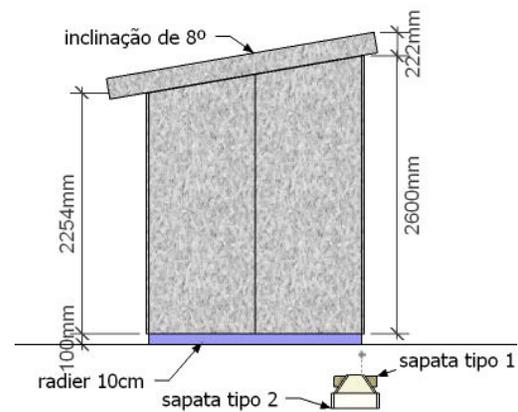


Figura 35 – Vista lateral esquerda

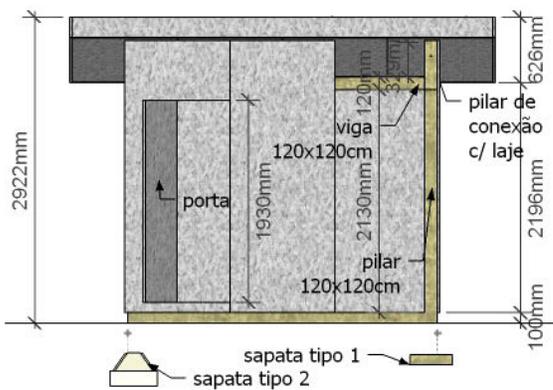


Figura 36 – Vista frontal

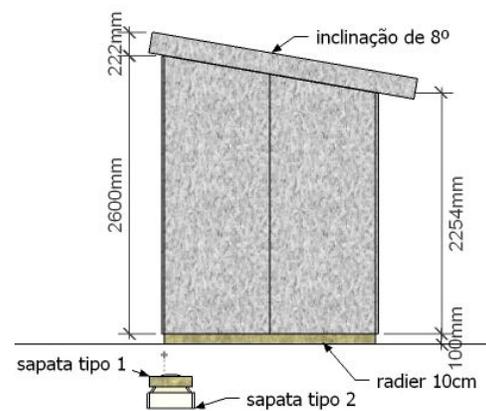


Figura 37 – Vista Lateral Direita

Os materiais empregados nas vedações verticais são placas cimentícias de madeira mineralizada de dimensões 1000x2600x25mm, com câmara de ar de 12 cm, definida pela espessura dos pilares. A laje é de concreto armado de 5cm de espessura, com fôrma em PCM de 2,5cm e inclinação de 8°, recomendada como máxima para coberturas vegetais sem dispositivos horizontais de retenção do solo.

O projeto de cobertura vegetal fundamenta-se em conceitos apresentados no capítulo 3, deste trabalho, variando a composição de suas camadas e materiais para sua adequação às características regionais. Desse modo, as camadas adotadas são: suporte estrutural, impermeabilização, camada drenante, manta filtrante (e anti-raiz), solo preparado e vegetação.

A orientação da inclinação da cobertura dos protótipos é Norte, de modo a obter maior incidência solar. Para evitar sombreamento durante o ano, o distanciamento entre os protótipos é ilustrado pela Figura 38. Essa medida está de acordo com a fórmula para obtenção da altura solar, levando em consideração a latitude solar do local, que é 27° 36', a declinação solar de 23° 27' para o inverno e o azimute de 0° que corresponde ao meio-dia.

$$\sin h = \sin F \sin d + \cos F \cos d \cos A$$

onde:

h= altura solar

F= latitude do observador

d= declinação solar

A= azimute

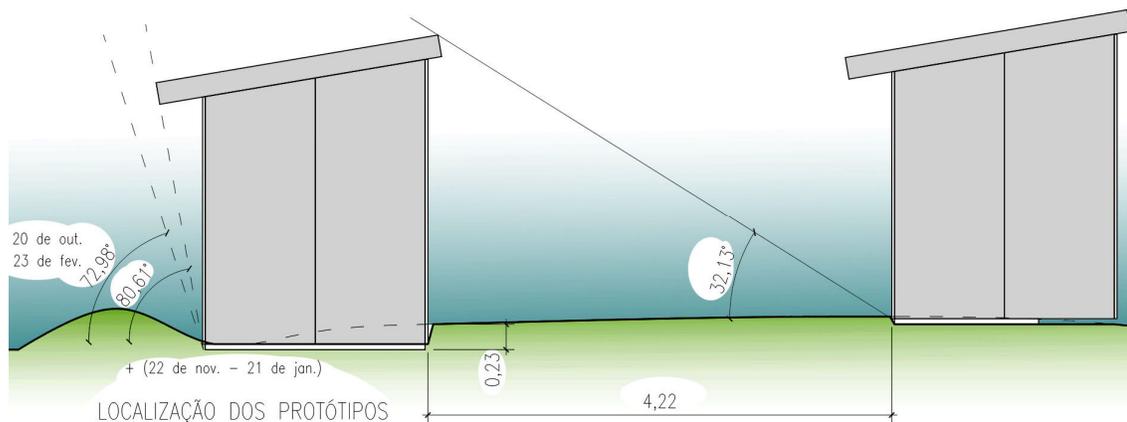


Figura 38 – Sugestão para localização, evitando sombreamento dos protótipos

Os detalhes dos componentes dos protótipos são apresentados nas Figura 39 à Figura 41, ilustrando a infra-estrutura em radier, os pilares e revestimentos externo e interno e laje inclinada com PCM. Para cada etapa de análise higrotérmica, utilizaram-se os seguintes sistemas de cobertura: laje de concreto sem impermeabilização, telhamento de fibrocimento e cobertura vegetal.

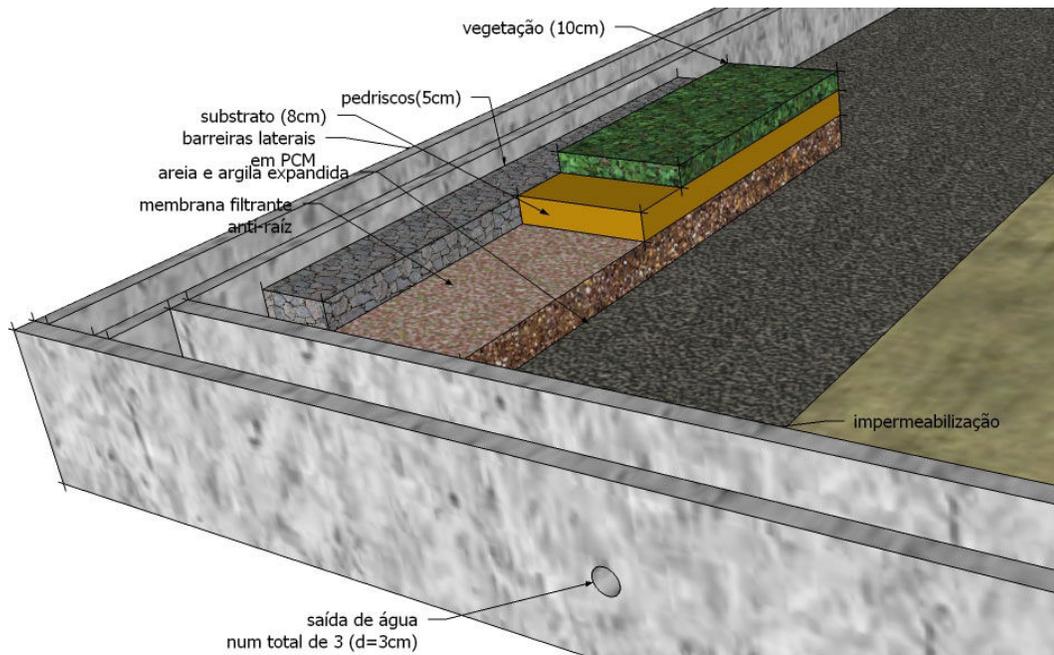


Figura 39 – Detalhe da cobertura vegetal na parte de saída de água e suas camadas

As lajes também são compostas com placas de PCM, servindo de fôrma para a sua concretagem e forro. Junto à laje também se concretaram vigas perimetrais delimitando a cobertura, conforme mostra a Figura 40.

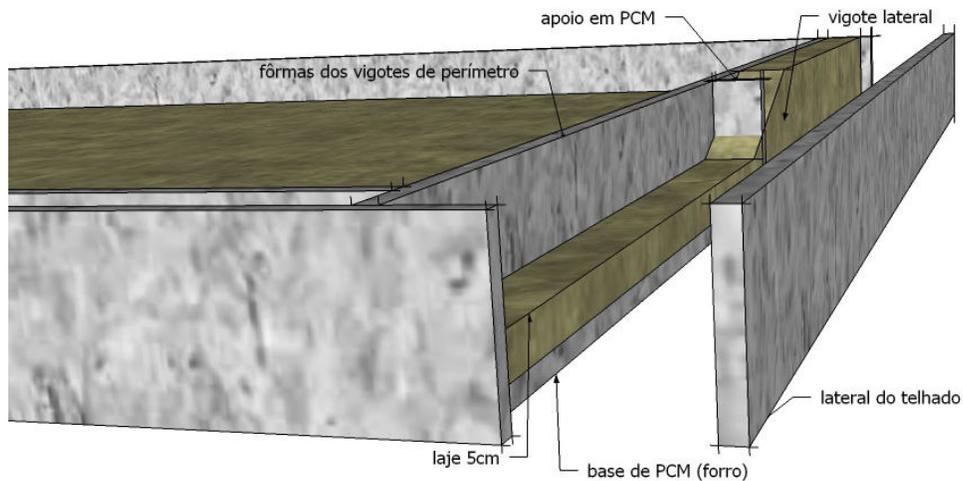


Figura 40 – Detalhe de montagem prévia da laje de cobertura

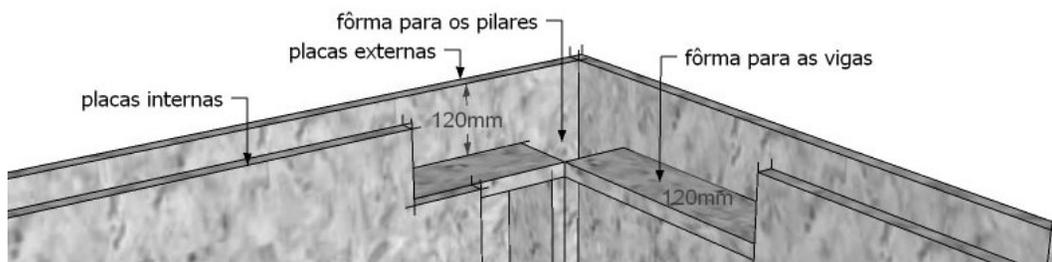


Figura 41 – Paredes com formas para pilares e vigas do protótipo

A cobertura vegetal está organizada em camadas, caracterizando a construção de uma cobertura vegetal extensiva. Utilizou-se a vegetação do local da construção, retirando-a em leivas e colocando-as acima das subcoberturas preparadas, conforme mostra a Figura 39. Essa escolha levou em consideração as espécies já aclimatadas ao ambiente, por ser uma opção mais econômica.

As camadas escolhidas são: impermeabilização com manta asfáltica aluminizada; camada com areia e argila expandida; manta anti-raiz com propriedade filtrante; substrato da própria leiva retirada do local e misturada com areia, aumentando a capacidade de drenagem e armazenamento de água e a vegetação do local.

A princípio, as camadas de impermeabilização e de drenagem seriam diferentes, utilizando mantas PVC e bandejas de ovos impermeabilizadas. Porém, o distribuidor da manta impermeabilizante não conseguiu fornecê-las em pequenas quantidades, substituindo-as por uma manta asfáltica. Já nas bandejas, verificou-se a impossibilidade de executar a impermeabilização, tanto pelo custo (se feita com resinas) ou pela demora na aplicação e secagem (no caso da utilização de hidroasfalto).

4.2. CONSTRUÇÃO

A construção do protótipo iniciou-se no dia 25 de maio de 2007 e terminou, após a concretagem das lajes, no dia 04 de setembro de 2007. A seguir são descritas as etapas da construção do protótipo até o complemento do trabalho com a execução da cobertura de fibrocimento.

a) **Locação dos protótipos**

Com o auxílio de um relógio solar, procedeu-se à locação dos protótipos, com a face voltada para o norte verdadeiro.

Através do Gráfico 2, com a diferença entre a hora legal e a hora solar, foi possível calcular a diferença da hora local para a hora solar, aumentando assim a precisão do norte solar. A hora legal se baseia no movimento do Sol médio; no Brasil, obedece ao meridiano da cidade de Brasília. Assim, para se obter a orientação correta, utilizou-se a hora solar da longitude em questão.

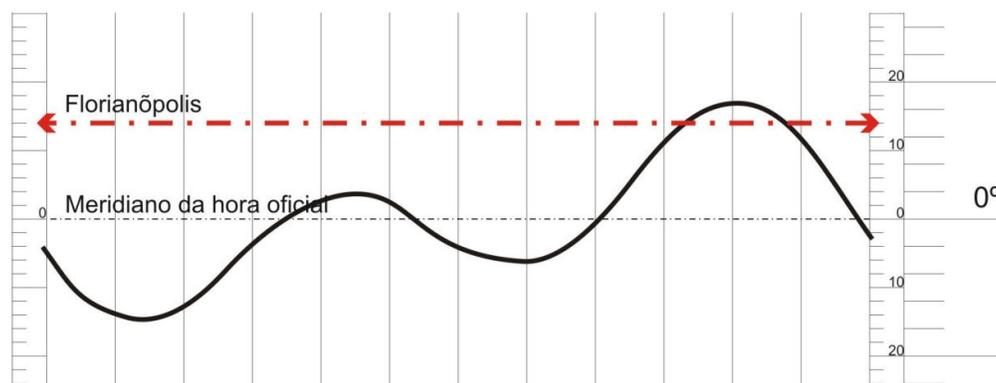


Gráfico 2 - Diferença entre a hora legal e a hora solar para Florianópolis

A linha contínua divide o gráfico: aos valores localizados para cima são adicionados os minutos correspondentes, enquanto que, aos valores de baixo, os minutos são subtraídos. Também existe uma diferença de 3° e $31'$ de Florianópolis (mais especificamente da localização do protótipo) em relação ao meridiano da hora oficial que é o de 45° (- 3 horas).

Com estacas de madeira, martelo, fio de nylon e pregos, delimitou-se a área de locação dos protótipos. Para o nivelamento, utilizou-se uma mangueira de nível e, assim, procedeu-se à escavação do terreno.



Figura 42 – Escavação e nivelamento



Figura 43 – Preparo para base do radier

Após a escavação do terreno e seu nivelamento, obteve-se uma diferença do protótipo da frente 23 cm mais baixo do que o dos fundos, diminuindo a medida necessária entre ambos para evitar o sombreamento e um conseqüente erro na obtenção das medições.

O material utilizado nessa etapa foi um relógio solar, gráfico da curva de diferença entre a hora legal e solar, fio de nylon, pá de corte, pedaços de madeira, martelo, prego e mangueira de 10 m com água.

b) Corte dos painéis

Com os painéis apoiados sobre cavaletes, foram cortados com serra elétrica manual com disco de vídea de 10 cm de diâmetro. As medidas e o número de peças foram baseados no projeto e no protótipo em 3D feito no programa Google SketchUp.



Figura 44 – Corte de todos os painéis



Figura 45 – Estocagem dos painéis, separados de acordo com suas características

Os painéis foram colocados num abrigo protegido de intempéries, separados por grupos, contendo as mesmas características, bem como por ordem de utilização.

Foram utilizados serra circular manual, disco de corte de madeira com vídea, cavaletes de corte, lápis para marcação, grampos para prender as chapas de cortes iguais e todos os equipamentos de proteção individual necessários para a segurança.

c) Fôrmas, armaduras e concretagem do radier

As fôrmas do radier são de PCM, seguindo medidas estipuladas no projeto do protótipo 3,00x2,05m. As armaduras utilizadas são treliças pré-fabricadas para laje, disponíveis na UFSC, amarradas entre si com arame recozido e com esperas para os pilares nos quatro cantos do retângulo formado.

Para concretagem, utilizou-se uma mistura de cimento, areia, pedra e água na relação de 1:3:3:0,5, obtendo-se uma resistência de projeto de 15MPa. O radier tem uma espessura de 15 cm final.



Figura 46 – Fôrmas e ferragens do radier



Figura 47 – Concretagem do radier

Os equipamentos e materiais utilizados na concretagem do raider foram pá, carrinho de mão, betoneira, balde de 20 litros, cimento portland CP-II, brita nº 1 e areia média.

d) Montagem dos painéis

Primeiramente fez-se a montagem das paredes no chão, com argamassa de assentamento e parafusos para o seu posterior levantamento, conforme Figura 48. Essa técnica não teve resultados satisfatórios, pois, primeiramente, o peso dos painéis completos resultariam entre 100 kg e 150kg, sendo difícil erguê-los manualmente. Mesmo se fosse possível, tal movimento geraria esforços concentrados nas conexões e ligações entre os painéis.

Posteriormente, ocorreu a montagem dos painéis cortados diretamente sobre o radier, começando por um dos cantos, de modo a formar uma coluna resistente para a continuação das vedações, de acordo com a Figura 49. Primeiramente foram apoiados com escoras de eucalipto e depois aparafusados entre si, seguindo assim sucessivamente até as duas últimas placas, colocadas de dentro para fora.

Algumas considerações foram observadas no término do primeiro protótipo. As placas interiores da vedação, com exceção da do meio, foram cortadas em 0,5cm cada, para facilitar a sua montagem *in loco*, pois as dimensões não coincidiram exatamente.



Figura 48 – Montagem no solo dos painéis



Figura 49 – Montagem dos painéis com escoras

A concretagem do radier não deixou a superfície totalmente lisa, tendo pequenas imperfeições e desníveis. Assim, notou-se que na montagem dos painéis, é imprescindível que a base esteja perfeitamente nivelada, para o apoio nivelado dos painéis, evitando problemas na montagem.

Os equipamentos e materiais utilizados foram: aparafusadeira elétrica com bateria, martelo, escoras de eucalipto, argamassa colante para pisos AC-I, silicone e parafusos.

e) **Concretagem dos pilares e vigas**

Após a montagem dos painéis colocaram-se as armaduras dos pilares, como se vê na Figura 50, dentro dos seus respectivos locais. A armadura utilizada nos pilares e vigas é a mesma treliça utilizada no radier.

A concretagem procedeu-se com uma mistura de cimento, brita nº 1, areia média e água na proporção de 1:3:3:0,5. Os pilares apresentam seção quadrada de 12 cm de lado. Para melhorar a ligação do painel de PCM com o concreto dos pilares, colocaram-se parafusos nas placas na região dos pilares, aumentando a ancoragem dos painéis de vedação.



Figura 50 – Concretagem dos pilares



Figura 51 – Concretagem das vigas

Ainda nessa etapa, lançou-se concreto também na parte inferior, dentro da câmara de ar, em todo o perímetro do protótipo. Assim, obteve-se uma melhor ligação dos painéis, aumentando a rigidez do conjunto, principalmente nos painéis que não apresentam contato com pilares.

Após uma semana de cura dos pilares, preparou-se a base das vigas e colocaram-se as armaduras conforme a Figura 41.

f) Fôrmas, armaduras e concretagem da laje

Após 7 dias de cura das vigas e 14 dias de cura dos pilares, procedeu-se à colocação das placas de PCM para a base da laje. Também procedeu-se o aparafusamento dessas placas nas vedações verticais, bem como nas laterais, mostradas na Figura 52. Colocaram-se as escoras para a sustentação da laje no interior, espaçadas a cada 85 cm, e nos beirais a cada 50 cm.



Figura 52 – Montagem das formas da laje



Figura 53 – Concretagem da laje e sua ferragem

Com a montagem das fôrmas, cortaram-se as armaduras, colocando-as por sobre a base da laje, amarrando-as nas esperas dos pilares e entre si. Antes da concretagem das lajes, colocaram-se 4 parafusos no centro do vão interno dos painéis a fim de aumentar a ancoragem às fôrmas de PCM na laje.

A concretagem de cada laje levou cerca de 5 horas, tendo uma camada de 5 cm de concreto, totalizando 7,5cm de espessura. Os materiais e equipamentos utilizados foram pá, carrinho de mão, betoneira, dois baldes de 20 litros, escada, andaimes, cimento portland CP-II, brita nº 1 e areia média. Também se utilizou para a montagem das fôrmas e armaduras serra circular com disco de corte para metais, aparafusadeira elétrica, torquês, arame recozido e aço para construção civil.

g) Execução da cobertura vegetal

Após a concretagem da laje e sua cura, escolheu-se o protótipo 02 para a execução da cobertura vegetal, pois a laje apresentava 21 dias de cura. Assim procedeu-se a colocação da camada de impermeabilização de manta asfáltica aluminizada, evitando a perfuração pelas raízes das plantas.

Junto à etapa de impermeabilização da laje colocaram-se os pontos de drenagem, mostrados na Figura 55, para a retirada da água excedente na cobertura, proveniente das chuvas ou irrigação, evitando seu acúmulo na parte inferior da cobertura.



Figura 54 – Impermeabilização da cobertura vegetal



Figura 55 – Drenagem para água pluvial excedente

Após a impermeabilização, colocou-se uma camada de membrana geotêxtil de poliéster. Na parte inferior foi necessária uma emenda, sendo sobreposta uma camada de 20 cm, como mostra a Figura 56.

Para ajudar a drenagem, colocou-se nos perímetros da cobertura uma camada de brita, ilustrada pela Figura 57, facilitando uma possível manutenção das saídas de drenagem da cobertura.



Figura 56 – Sobreposição de 20 cm da geomembrana



Figura 57 – Colocação da brita no perímetro da cobertura

Sobre a manta filtrante colocou-se uma mistura de areia com argila expandida, colaborando ao mesmo tempo para a drenagem do vegetal e o armazenamento de água através das propriedades físicas dos grânulos de argila expandida.



Figura 58 – Preparação da base da cobertura vegetal



Figura 59 – Transplante das leivas do solo para a cobertura vegetal

Para a camada vegetal, escolheu-se a existente nas imediações do local da construção. Assim, procedeu-se à retirada de uma camada de leiva, com aproximadamente 8 cm e a colocação por sobre a camada de drenagem e absorção, conforme se pode observar na Figura 59.



Figura 60 – Cobertura vegetal pronta

Após a colocação das leivas de vegetação, cortaram-se as sobras da manta filtrante, deixando 5 cm de sobras em todo o perímetro. Para deixar a cobertura uniforme, preencheu-se o espaço entre as leivas com areia grossa. Também se polvilhou areia por sobre toda a extensão da cobertura, aumentando a capacidade de drenagem superficial. Com a cobertura pronta, irrigou-se por uma semana, durante os finais de tarde, auxiliando na estabilização das plantas.

h) Execução da cobertura em fibrocimento

Para a última análise, após as medições simultâneas das temperaturas na laje e cobertura vegetal, executou-se a cobertura de fibrocimento. Primeiramente, fez-se uma estrutura de madeira acima da laje, servindo como base para a fixação das telhas e aparafusada na laje. Após a execução da estrutura em madeira, procedeu-se à fixação das telhas no sentido oeste-leste com pregos telheiros.

Os materiais e equipamentos utilizados foram telhas de fibrocimento com dimensões de 2440x500x4mm, pregos telheiros, pregos com cabeça, parafusos, ripas de pinus com dimensões de 100x25mm, manta asfáltica aluminizada e brita nº



Figura 61 - Cobertura de fibrocimento



Figura 62 - Calha localizada na base da cobertura

Após o término da execução de todo o telhamento, fez-se na base da cobertura uma calha, impermeabilizada com manta asfáltica aluminizada e protegida com brita. A calha tem como objetivo receber toda a água pluvial das telhas e levá-la ao ponto central de drenagem.

5. ANÁLISE DE DESEMPENHO TÉRMICO

Neste capítulo, são analisados os desempenhos térmicos dos sistemas de vedação e coberturas construídos no canteiro experimental do Laboratório de Sistemas Construtivos da UFSC. Realizaram-se a simulação do desempenho térmico, o acompanhamento das espécies vegetais expostas na cobertura e as medições de desempenho higrotérmico realizadas nos protótipos.

5.1. DETERMINAÇÃO ANALÍTICA DE DESEMPENHO TÉRMICO

Realizou-se a simulação de desempenho térmico dos sistemas de vedação e coberturas através da norma NBR 15.220, que apresenta os métodos para o cálculo da transmitância térmica, capacidade térmica, atraso térmico e do fator solar dos elementos e componentes das edificações.

5.1.1. Desempenho térmico das vedações verticais

Para se ter um parâmetro da contribuição das vedações verticais no desempenho global do protótipo, calcularam-se os valores referentes à transmitância térmica (U), fator solar (FCS) e atraso térmico (φ). Assim, pode-se determinar a contribuição das paredes no seu desempenho térmico, bem como, saber se satisfazem aos requisitos da norma, listados na Tabela 10.

Tabela 10 – Requisitos para o sistema de vedação vertical (ABNT, NBR 15.220)

Região 3	Florianópolis	Tipo de vedação (externas)
$U =$	$\leq 3,6 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	Parede leve refletora
$\varphi =$	$\leq 4,3$ horas	
FCS =	$\leq 4,0 \%$	

No cálculo, consideraram-se três seções verticais para a parede: Sa, Sb e Sc, como mostra a Figura 63.

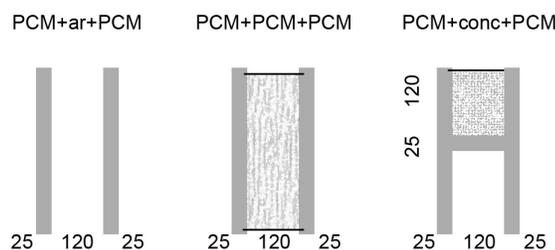


Figura 63 - Diferentes seções das paredes de PCM (unidades em mm)

Tabela 11 – Valores para cada metro quadrado de vedação vertical

TOTAL		
Resistência térmica - seção (Rt) =	0,4949	(m ² .K)/W
Resistência térmica – ambiente a ambiente (RT) =	0,6649	(m ² .K)/W
Transmitância (U) =	1,5040	W/(m ² .K)
Capacidade térmica (CT) =	54,92176644	kJ/(m ² .K)
B0 =	54,92176644	
B1 =	25,0803	
B2 =	-19,59118203	
Atraso térmico (φ) =	3,4253	horas
Fator de ganho de calor solar (FCS) =	1,8048	%

A Tabela 11 demonstra que os resultados são bastante satisfatórios para Florianópolis (região 3) nos quesitos transmitância térmica (U), fator solar (FCS) e atraso térmico (φ). Isso demonstra um bom tratamento térmico, através das características das placas de PCM.

5.1.2. Desempenho térmico das coberturas

O cálculo prescrito na NBR 15.220 não pode ser aplicado na avaliação de desempenho térmico para coberturas vegetais, pois não são conhecidos os valores da resistência térmica da vegetação, além de não serem consideradas as influências da absorção e da perda de água dos materiais, como, no caso, o índice de saturação do substrato e a capacidade de evapotranspiração dos vegetais.

Contudo, como simplificação, considera-se a cobertura sem a vegetação, somente com as subcamadas mostradas na Figura 64, sendo a camada externa de “terra argilosa seca”.

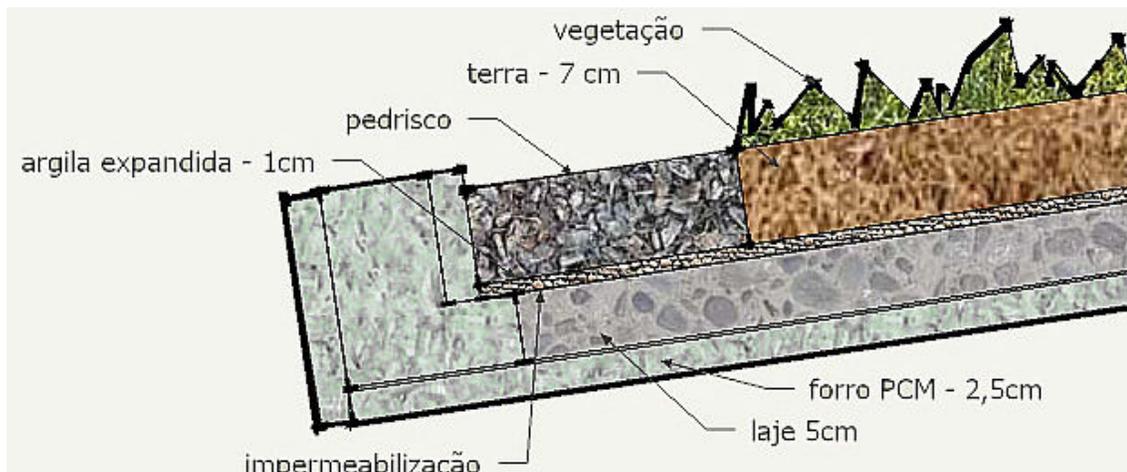


Figura 64 – Detalhe das camadas e espessuras utilizadas pro cálculo

A 3ª parte da NBR 15.220, que trata do zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitação unifamiliares de interesse social, estabelece os requisitos para as diversas regiões bioclimáticas brasileiras. Florianópolis localiza-se na região 3 e os valores dos requisitos estão na Tabela 12.

Tabela 12 – Requisitos para o sistema de cobertura (ABNT, NBR 15.220)

Região 3	Florianópolis	Tipo de vedação (externas)
U =	$\leq 2,0 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K})$	Cobertura leve isolada
φ =	$\leq 3,3$ horas	
FCS =	$\leq 6,5 \%$	

Para o cálculo, levou-se em consideração a seção da cobertura, segundo espessuras demonstradas na Figura 64. Os resultados dos cálculos estão nas Tabela 13, Tabela 14 e Tabela 15, com simulações de fluxo de calor descendente e ascendente.

Tabela 13 – Valores de cálculo de desempenho térmico para cobertura com terra

Valores para situação de fluxo de calor descendente		
Resistência térmica - seção (Rt) =	0,4718	(m ² .K)/W
Resistência térmica – ambiente a ambiente (RT) =	0,6818	(m ² .K)/W
Transmitância (U) =	1,4667	W/(m ² .K)
Capacidade térmica (CT) =	179,4	kJ/(m ² .K)
B0 =	36,6	
B1 =	17,5326	
B2 =	-83,97039259	
Atraso térmico (φ) =	2,7301	horas
Fator de ganho de calor solar (FCS) =	4,4002	%
Valores para situação de fluxo de calor ascendente		
Resistência térmica - seção (Rt) =	0,4718	(m ² .K)/W
Resistência térmica – ambiente a ambiente (RT) =	0,6118	(m ² .K)/W
Transmitância (U) =	1,6346	W/(m ² .K)
Capacidade térmica (CT) =	179,4	kJ/(m ² .K)
B0 =	36,6	
B1 =	13,5204	
B2 =	-99,58963517	
Atraso térmico (φ) =	3,1089	horas
Fator de ganho de calor solar (FCS) =	4,9037	%

Os resultados são bastante satisfatórios para Florianópolis nos requisitos transmitância térmica (U), fator de calor solar (FCS) e atraso térmico (φ) para o fluxo de calor descendente (situação de verão/dia), bem como para o fluxo de calor ascendente (situação de inverno/noite).

Para comparação entre as coberturas estudadas, também se calcularam os valores para a laje de concreto e cobertura com telhamento. Na Tabela 15, os valores de transmitância não satisfazem a norma, tanto na situação de fluxo de calor

descendente e ascendente. Já para o atraso térmico, as duas situações satisfazem a norma, bem como o FCS na situação de fluxo de calor descendente, ou seja, ganho de calor.

Tabela 14 – Valores de cálculo de desempenho térmico para laje

Valores para situação de fluxo de calor descendente		
Resistência térmica - seção (Rt) =	0,1952	(m ² .K)/W
Resistência térmica – ambiente a ambiente (RT) =	0,4052	(m ² .K)/W
Transmitância (U) =	2,4677	W/(m ² .K)
Capacidade térmica (CT) =	135,3	kJ/(m ² .K)
B0 =	25,3	
B1 =	29,2863	
B2 =	-662,2	
Atraso térmico (φ) =	1,4602	horas
Fator de ganho de calor solar (FCS) =	6,4160	%
Valores para situação de fluxo de calor ascendente		
Resistência térmica - seção (Rt) =	0,1952	(m ² .K)/W
Resistência térmica – ambiente a ambiente (RT) =	0,3352	(m ² .K)/W
Transmitância (U) =	2,9830	W/(m ² .K)
Capacidade térmica (CT) =	135,3	kJ/(m ² .K)
B0 =	25,3	
B1 =	17,0559	
B2 =	-715,2578125	
Atraso térmico (φ) =	1,9134	horas
Fator de ganho de calor solar (FCS) =	7,7557	%

Na Tabela 15, o único valor que não satisfaz a NBR 15.220 é o de transmitância para a situação de perda de calor. Isso ocorre porque se classificou a câmara de ar entre a laje e o telhamento como câmara de ar muito ventilada, fazendo com que, no cálculo de resistência térmica, a camada externa não possa ser considerada.

Tabela 15 – Valores de cálculo de desempenho térmico para cobertura de fibrocimento

Valores para situação de fluxo de calor descendente		
Resistência térmica - seção (Rt) =	0,2016	(m ² .K)/W
Resistência térmica – ambiente a ambiente (RT) =	0,6216	(m ² .K)/W
Transmitância (U) =	1,6089	W/(m ² .K)
Capacidade térmica (CT) =	144,372	kJ/(m ² .K)
B0 =	34,372	
B1 =	38,5409	
B2 =	-284,3121783	
Atraso térmico (φ) =	1,7293	horas
Fator de ganho de calor solar (FS) =	3,2177	%
Valores para situação de fluxo de calor ascendente		
Resistência térmica - seção (Rt) =	0,1952	(m ² .K)/W
Resistência térmica – ambiente a ambiente (RT) =	0,4752	(m ² .K)/W
Transmitância (U) =	2,1042	W/(m ² .K)
Capacidade térmica (CT) =	144,372	kJ/(m ² .K)
B0 =	34,372	

	B1 =	16,3456	
	B2 =	-737,0551102	
	Atraso térmico (φ) =	2,6553	horas
	Fator de ganho de calor solar (FCS) =	4,2084	%

Nessa análise, notou-se que a maior contribuição para a melhoria no desempenho térmico através do método de cálculo da NBR 15.220 é dada pelo PCM, descrito como “aparas de madeira aglomerada com cimento em fábrica”.

Em comparação com os resultados obtidos dos três sistemas de coberturas, segundo o projeto de norma ABNT 02.136.01.007, os níveis de desempenho quanto à transmitância térmica são demonstrados na Tabela 16. Segundo os critérios definidos pelo projeto de norma, os níveis de desempenho são classificados em mínimos (M), intermediários (I) e superiores (S). Os campos da tabela que ficaram sem nomenclatura foram os que não atingiram os requisitos mínimos.

Tabela 16 - Critérios de desempenho quanto à transmitância térmica (fonte: ABNT 02.136.01.007)

Sistemas de coberturas analisados			
	Vegetal	Laje	Fibrocimento
Transmitância térmica (U): - Verão	1,46 W/(m ² .K)	2,46 W/(m ² .K)	1,60 W/(m ² .K)
	- Inverno	1,63 W/(m ² .K)	2,98 W/(m ² .K)
Nível de desempenho: - Verão	I	-	M
	- Inverno	M	-

De acordo com a NBR 15.220, a zona bioclimática 3, onde se localiza Florianópolis, e com Lamberts *et al* (1997), o Resfriamento Evaporativo Indireto não é uma estratégia bioclimática citada para o melhoramento do rigor térmico no interior da edificação. As estratégias citadas são as de Ventilação para o verão e Aquecimento da Edificação através da Inércia Térmica com vedações internas pesadas no inverno.

5.2. ANÁLISE EXPERIMENTAL DE DESEMPENHO HIGROTÉRMICO

As medições higrotérmicas foram realizadas em quatro etapas. A primeira etapa corresponde à verificação de uniformidade de medições de temperatura e umidade entre os aparelhos. A segunda, corresponde às medições obtidas nos protótipos, determinando a variação de temperatura e umidade entre eles. As etapas

restantes correspondem às medições comparativas nos dois protótipos, entre laje e cobertura vegetal e entre cobertura com telhamento e cobertura vegetal.

Os dois protótipos foram construídos isoladamente, com as mesmas dimensões e materiais, posicionados com a mesma orientação solar. As medições de cada etapa foram realizadas simultaneamente nos dois protótipos e em pontos equivalentes.

Os aparelhos utilizados nas medições são do tipo HOBO® da Onset Computer Corporation, da família H8. Dois deles medem a temperatura e a umidade, e o terceiro, além dessas medições, tem dois pontos externos, permitindo a obtenção de mais duas medições de temperaturas. Segundo a Onset Computer Corporation (2007), o equipamento opera em umidades relativas de 0 a 95% e em temperaturas de -20° C até 70° C. A precisão do aparelho para temperatura segue a curva do Gráfico 3, e para os valores de umidade relativa, é de $\pm 5\%$ entre temperaturas de 5° C até 50° C.

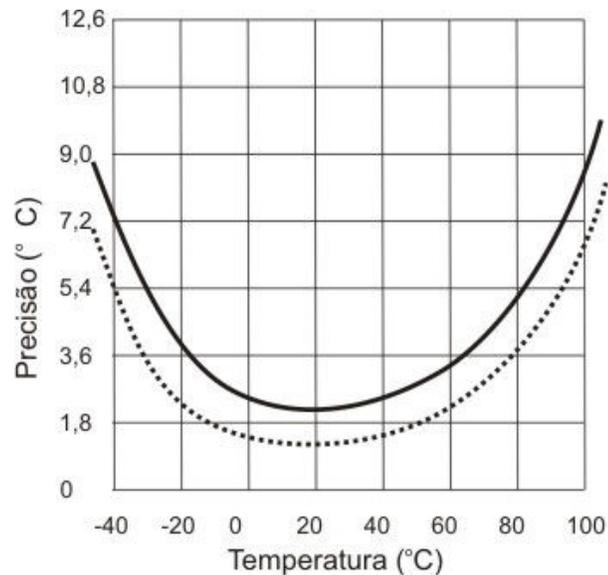


Gráfico 3 - Precisão indicada pelo fabricante para o HOBO® em diferentes temperaturas



Figura 65 – Equipamentos para as medições higrotérmicas

Os aparelhos utilizados e descritos anteriormente, ilustrados na Figura 65, foram numerados para facilitar a sua identificação. Também, com o mesmo objetivo, numeraram-se os protótipos conforme ilustra a Figura 66. Para medições externas colocou-se um equipamento HOBO® abaixo do beiral da construção vizinha, afim de protegê-lo de chuvas, ventos e incidência de radiação solar direta, como mostra a Figura 67.



Figura 66 - Localização e identificação dos protótipos para colocação dos HOBOS®



Figura 67 - Localização do HOBO® para medidas externas

Para a medição de temperatura e umidade absoluta, utilizaram-se as unidades definidas pelos aparelhos, graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) e gramas de água por metro cúbico de ar (g/m^3), respectivamente. A umidade relativa não foi utilizada, pois depende de fatores, como temperatura, para a sua obtenção, e, assim, não tem valores absolutos, o que dificulta a comparação dos dados. Através do Gráfico 4, pode-se entender melhor a diferença entre os valores de umidades e temperatura.

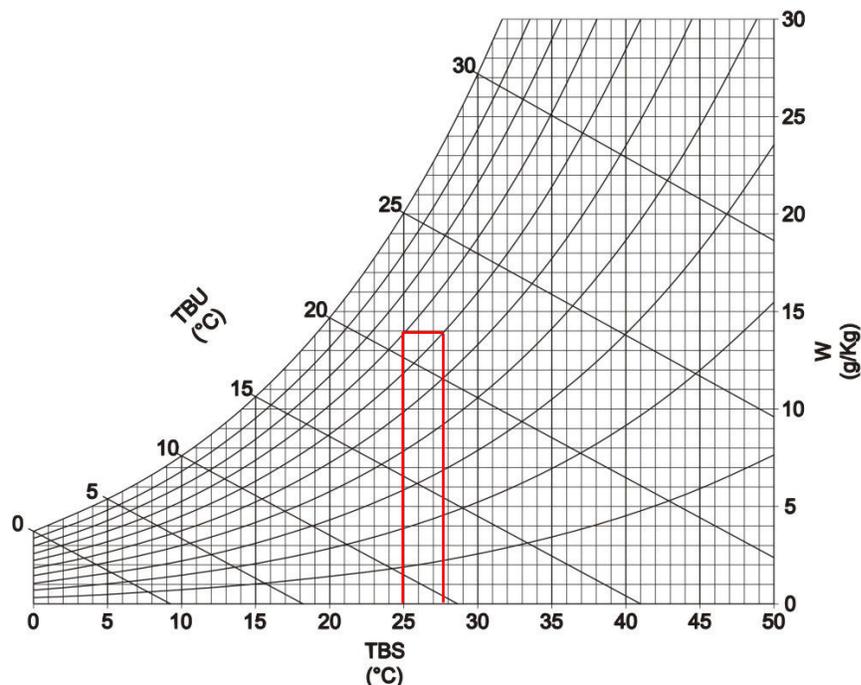


Gráfico 4 - Curva psicrométrica simplificada

Nota-se na curva psicrométrica que, durante o aumento da temperatura de 25°C para 28°C, a umidade relativa diminuirá de 70% para 80%; contudo, mantém umidade específica em 14 g/Kg. Isso ocorre porque a umidade relativa é a relação entre a umidade específica do ar e umidade da mistura do mesmo ar no seu ponto de saturação, tendo como base a mesma temperatura para as duas situações. Assim, com o aumento da temperatura e a manutenção da umidade absoluta, diminui-se a umidade relativa.

As medições realizadas nos aparelhos HOBO® são de umidade absoluta dadas pela razão entre a massa de vapor de água por volume de ar (g/m^3). Já na carta psicrométrica, o ábaco é de umidade específica, razão de massa de vapor de água por massa de ar g/kg . A diferença entre esses valores pode ser calculada através da fórmula abaixo.

$$\text{Umidade Absoluta} = \frac{\text{Umidade Específica}}{\text{Volume Específico}}$$

O cálculo da umidade absoluta (UA) se dá pela obtenção da umidade específica (UE), através das temperaturas de bulbo seco e úmido (TBS e TBU). Traça-se uma paralela às linhas de volume específico (VE) pelo cruzamento do TBS e TBU. Assim, acham-se os valores e calcula-se pela fórmula dada acima.

5.2.1. Verificação da uniformidade das medições entre os HOBOS®

Com o objetivo de verificar a uniformidade entre os três aparelhos, fez-se uma medição simultânea de todos eles dentro de uma caixa térmica de poliestireno revestido com plástico, com dimensões de 66x36x43cm. A comparação permite avaliar as variações das medições entre eles e saber se estão em conformidade com as margens de erro estabelecidas pelo fabricante, citadas no item 5.2.

Na Figura 68, pode-se observar os aparelhos de medição, colocados lado a lado e no fundo da caixa. Isto permite submetê-los praticamente às mesmas condições de trocas térmicas existentes entre os diferentes pontos localizados no interior.



Figura 68 - Localização dos HOBOS® na caixa térmica

No Gráfico 5, mostram-se os resultados das medições de temperatura durante o período de 4 horas 15 minutos e 12 segundos. O total de tempo das medições foi de 8 horas 42 minutos e 4 segundos, porém retiraram-se do gráfico as quatro horas seguintes, pois as temperaturas não apresentaram variação significativa.

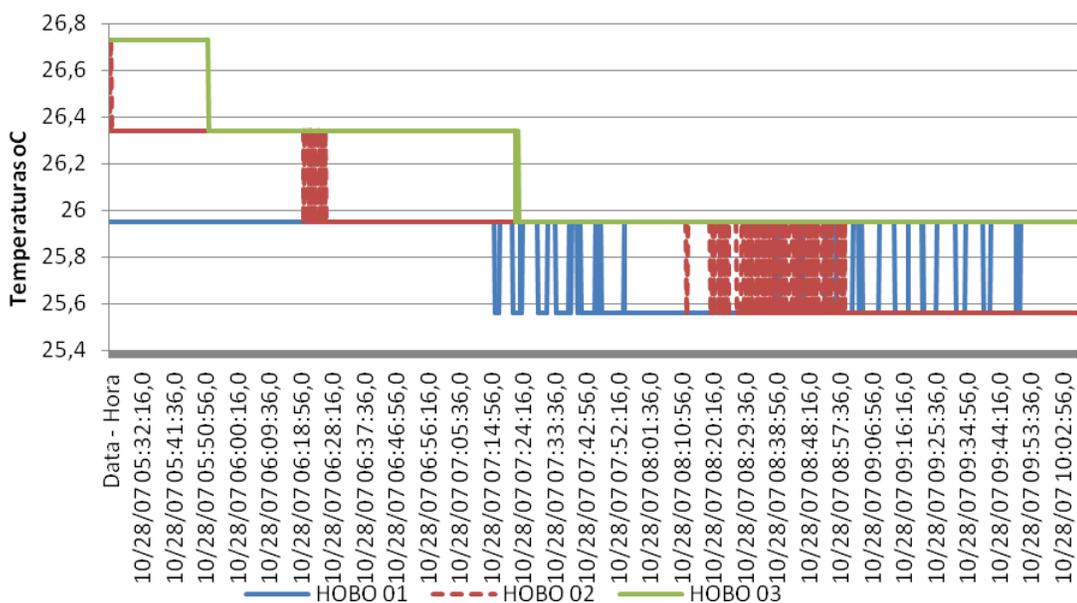


Gráfico 5 - Temperaturas obtidas nos três aparelhos dentro da caixa térmica

Os valores obtidos são uniformes, tendendo a se igualar no final das medições, com dois diferentes agrupamentos. Um deles, com o HOBO® 02, e o outro com as medições dos aparelhos 01, 03. Afim de facilitar a leitura, dividiu-se os gráficos com os valores para as temperaturas do aparelho 03 no Gráfico 6. O medidor externo “a” apresenta um menor atraso térmico, aproximadamente dez segundos, em comparação ao aparelho 03. Já o “b” tende a um atraso térmico maior, estabilizando a temperatura quarenta segundos depois.

5 – Análise de Desempenho Térmico

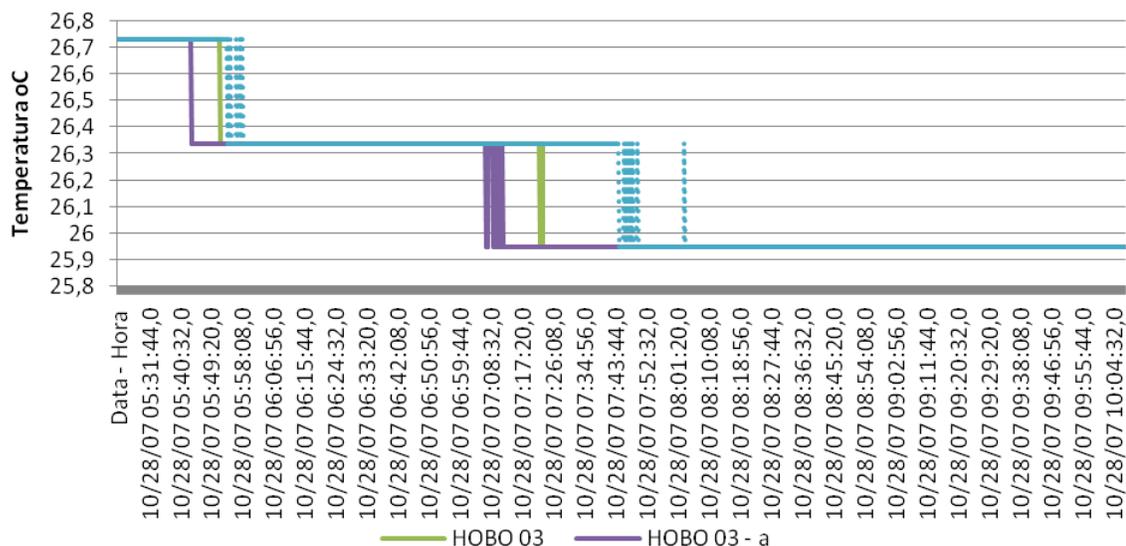


Gráfico 6 - Temperaturas obtidas pelo aparelho 03 e seus medidores externos dentro da caixa térmica

Através dos valores das temperaturas obtidas, a diferença percentual entre cada aparelho é apresentada na Tabela 17. O valor referencial adotado é o maior temperatura.

Tabela 17 - Diferença entre as medidas de temperatura

Equipamento/ Equipamento	02 (25,75° C)	03 (26,06° C)	03 – a (26,04° C)	03 – b (26,08° C)
01 (25,87° C)	0,48%	0,72%	0,66%	0,80%
02 (25,75° C)	0	1,21%	1,15%	1,29%
03 (26,06° C)	0	0	0,66%	0,08%
03 – a (26,04° C)	0	0	0	0,14%

De acordo com a Tabela 17, a maior diferença entre as médias é dada nos valores comparativos entre os equipamentos 02 e 03, com porcentagens de 1,21%, entre os aparelhos e 1,15% e 1,29%, para os pontos externos “a” e “b”, respectivamente. Já a maior diferença obtida entre as medições é de 0,78°C ou 2,96%, entre os aparelhos 03 e 01. Essas diferenças estão dentro da margem percentual indicada pelo fabricante de aproximadamente 5% nessas temperaturas, conforme visto no Gráfico 3.

Para os resultados de umidade absoluta, o Gráfico 7 mostra as medidas dos aparelhos. Nota-se a diferenciação no começo das medições entre todos os aparelhos; porém, os aparelhos 01 e 02 tendem a se igualar no final. Somente o

aparelho 03 mantém uma curva semelhante ao do aparelho 02, com uma diferença de aproximadamente 1 g/m^3 .

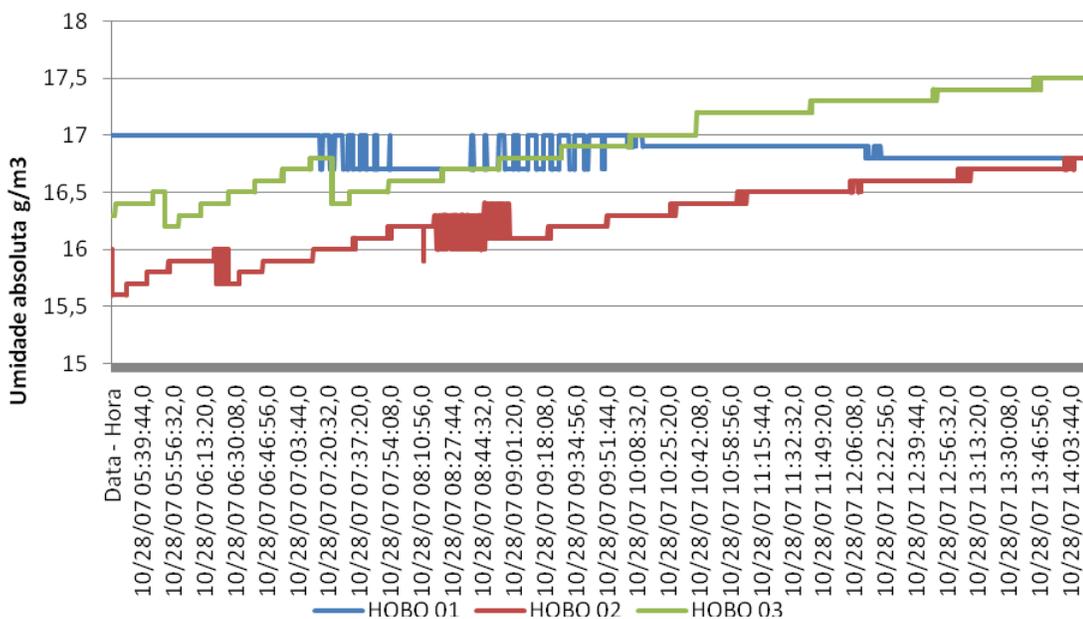


Gráfico 7 - Umidades absolutas obtidas pelos três aparelhos dentro da caixa térmica

Comparando os resultados de umidade absoluta, pode-se observar que a diferença aumentou, com os percentuais das médias do medidor 03 de 4,03% a mais do que o aparelho 02. A diferença diminui na comparação entre os aparelhos 01 e 02, com diferença de 3,58% e, entre os aparelhos 01 e 03, com 0,30%. A variação máxima de umidade absoluta entre os aparelhos é de $1,4 \text{ g/m}^3$, ou seja, 8,24%. Já a mínima é de $0,3 \text{ g/m}^3$, com um percentual de 1,80%.

Comparando-se os resultados das medições de temperatura e umidade absoluta, obtidos com a margem de erro especificada pelo fabricante, nota-se que os resultados não são satisfatórios em relação à maior variação obtida nas umidades absolutas. Porém, essa maior variação entre os equipamentos, mostrada nos gráficos, ocorreu no começo das medições, diminuído a diferença no final para $0,7 \text{ g/m}^3$, ou seja, 4% entre o grupo de equipamentos 01 e 02 em comparação ao aparelho 03.

5.2.2. Verificação da uniformidade de desempenho entre os protótipos

Entre os dias 11 e 14 de setembro de 2007, mediram-se as temperaturas internas dos protótipos e as temperaturas externas, com o objetivo de verificar as condições de uniformidade de desempenho dos dois protótipos. Para tanto, colocaram-se os medidores 01 e 03 nos centros dos protótipos, mostrado na Figura 69, e o 02 no beiral da construção vizinha.

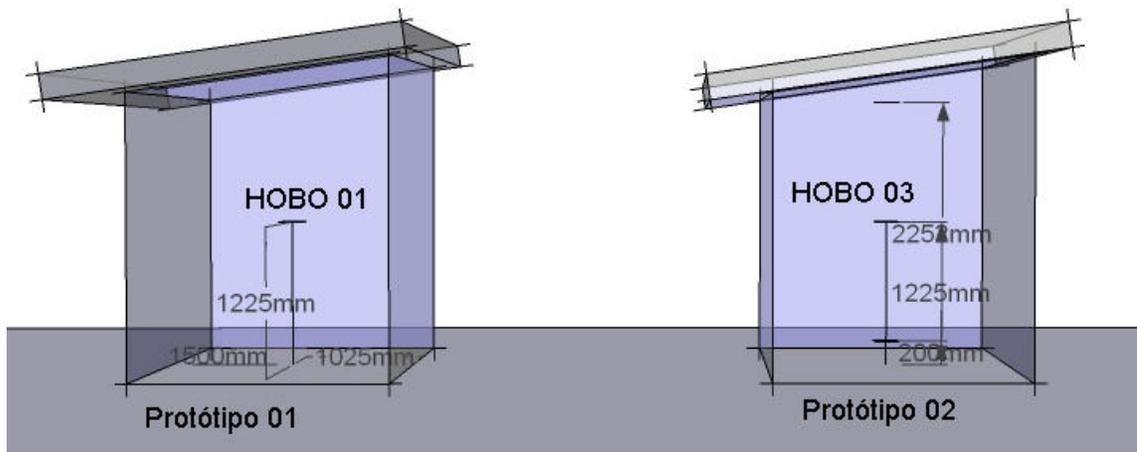


Figura 69 - Localização dos HOBOS® no interior do protótipo

O Gráfico 8 demonstra as temperaturas obtidas nos protótipos 01 e 02 durante o período de medição. Para a análise dos dados e obtenção de um valor referente à diferença, utilizou-se a média das temperaturas e calculou-se a porcentagem dessa diferença, que foi de 0,66%. A maior diferença nas variações da temperatura se deu nas duas cristas, com valores de 1,97K no primeiro dia às 13h e 28 min, ou seja 6,86%. Já no segundo obteve-se 1,17K de diferença com uma porcentagem de 4,38%.

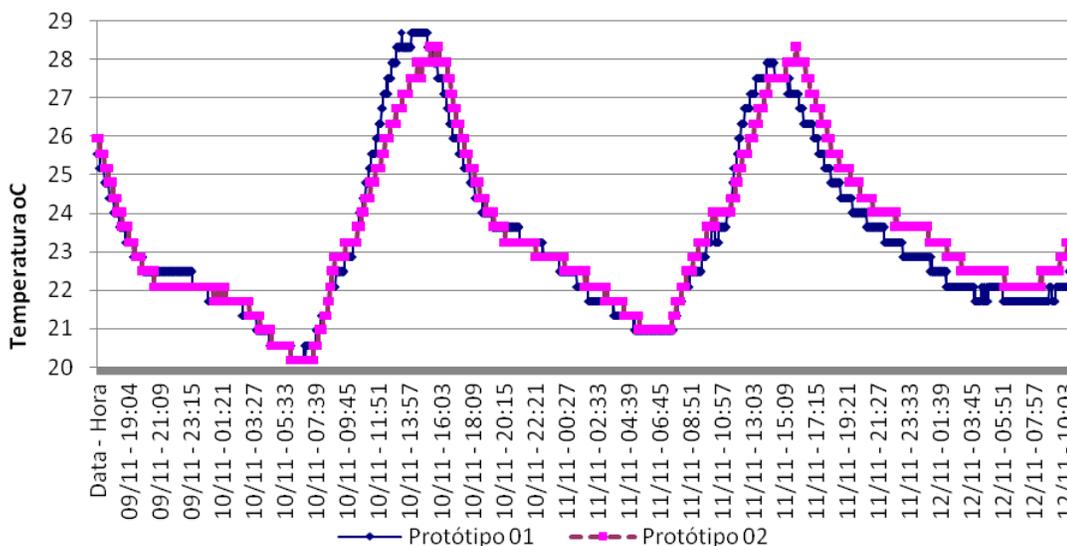


Gráfico 8 – Temperaturas obtidas pelos aparelhos nos dois protótipos

Com base no Gráfico 9, pode-se notar a diferença entre as umidades absolutas do protótipo 01 e 02. Elas se mantêm praticamente iguais, com uma pequena diferença no começo das duas curvas, entre as 11h e 19 horas. No dia 12 de setembro, às 14 h e 16 min, a diferença entre a umidade absoluta foi de $3,5 \text{ g/m}^3$ a mais no protótipo 02, com um percentual de 19,23%. A diferença média percentual entre todos os valores obtidos foi de 3,95%.

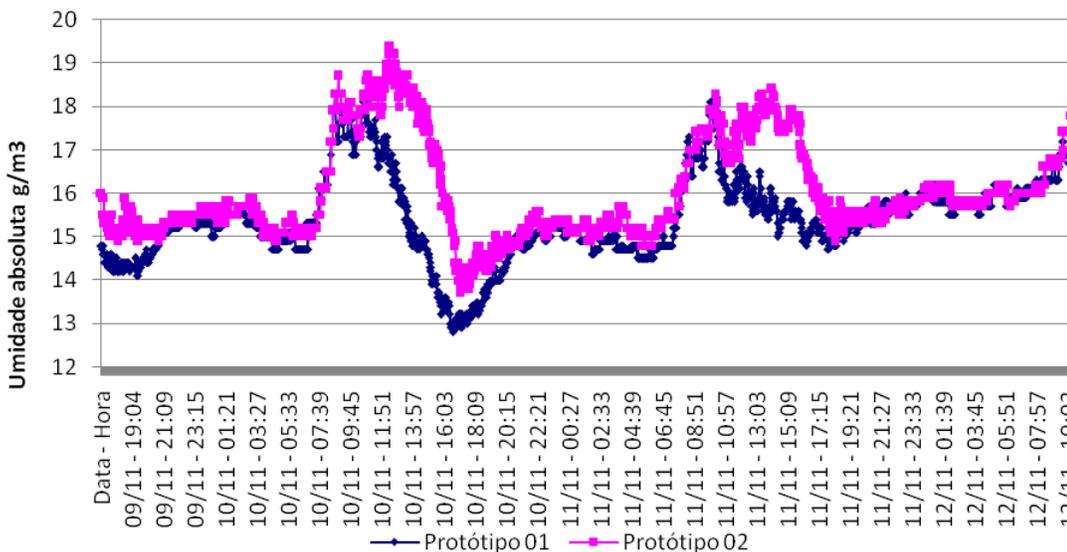


Gráfico 9 - Umidades absolutas obtidas pelos aparelhos nos dois protótipos

Após a coleta dos dados dos aparelhos, notou-se uma pequena diferença entre as medições. A fim de reduzir essas variações, verificou-se que existiam trocas de ar entre os ambientes interno e externo, assim selaram-se as frestas dos

protótipos com espuma de poliuretano, melhorando a estanqueidade ao ar, impedindo as trocas diretas do ar interno com o externo. As portas também receberam proteção para os vãos de abertura, com um filete de placas PCM aparafusado no perímetro de fora da porta, reduzindo a entrada de ar proveniente principalmente do quadrante sul, ou através da sucção do ar interno pela diferença de pressão exercida por ventos de outros sentidos.

5.2.3. Verificação de desempenho entre laje e cobertura vegetal

Após a fase de medição das temperaturas dos protótipos para verificar a igualdade de condições a que eles se encontravam, construiu-se a cobertura vegetal no protótipo número 02, conforme descrito no item “g” do capítulo 4.2.

Com a cobertura pronta, foram realizadas as medições entre os dias 02 e 04 de outubro. Para obter-se uma uniformidade entre as medições, utilizaram-se as mesmas medidas e localização dos aparelhos dentro dos dois protótipos..

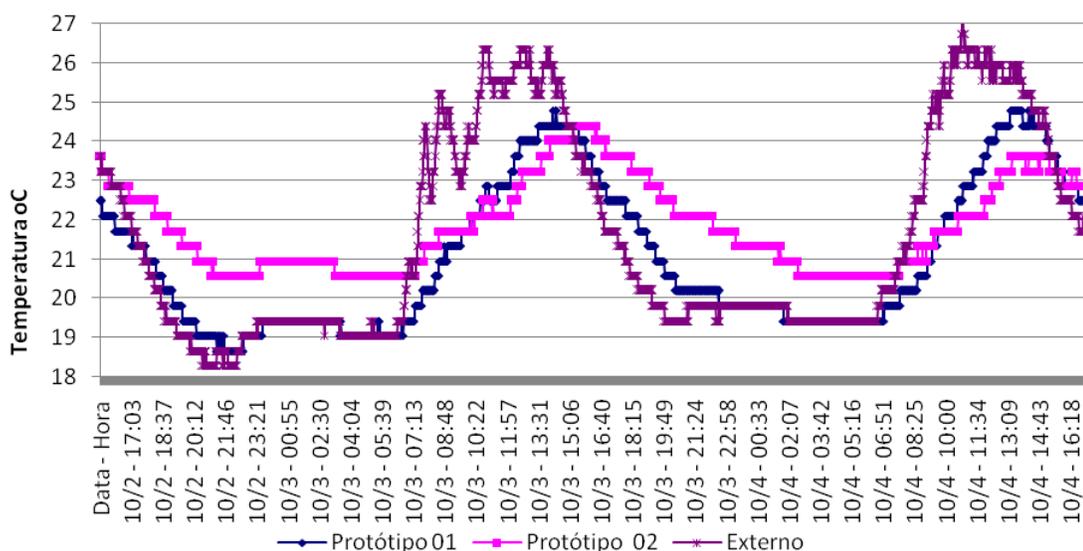


Gráfico 10 - Medições comparativas de temperaturas entre a laje e a cobertura vegetal

No Gráfico 10, pode-se observar que as temperaturas dos protótipos 01 e 02 apresentaram pequenas diferenças durante o período. A cobertura vegetal, nas situações de fluxo de calor ascendente, mantém a temperatura interna com aproximadamente 1°C de diferença, ou seja, perde menos calor para o ambiente externo. Também pode-se observar, na primeira crista do gráfico, que o atraso térmico da cobertura vegetal em relação à laje, foi de aproximadamente 2 horas. A

maior diferença entre os dados obtidos foi às 20h e 19min do primeiro dia, com 2,29°C ou 10,74% a mais no protótipo 02.

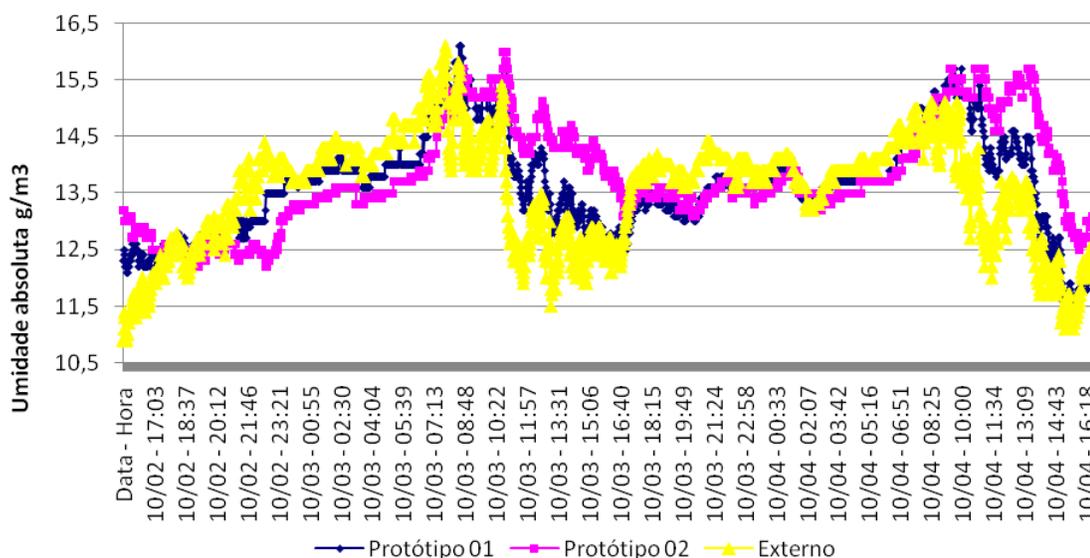


Gráfico 11 - Medições comparativas de umidade absoluta entre a laje e a cobertura vegetal

As medições de umidade absoluta, apresentadas no Gráfico 11, mostram que as umidades absolutas no interior dos protótipos têm uma diferença maior às 15h e 16min no último dia de medição com 2,1g/m³ ou 15,33%. A cobertura do protótipo 02, composta por uma manta impermeabilizante, mantém a umidade no seu interior, reduzindo as trocas de umidade entre os ambientes internos e externos. Também nota-se que as umidades absolutas nos protótipos 01 e 02 tendem a se igualar no final da tarde e no começo da manhã. Isso acontece porque as trocas de vapor de água entre exterior e interior no protótipo 01 são maiores, devido à menor resistência térmica e maior porosidade da superfície.

As medições demonstram um melhor desempenho higrométrico do protótipo 02, pois a laje está protegida por uma camada de impermeabilização, uma camada de substrato e de vegetação, possibilitando uma menor transmitância térmica. Essa permeabilidade da laje exposta, observada nos dados obtidos de umidade absoluta, mostra a necessidade de impermeabilização, mesmo com a inclinação de 8°.

Tabela 18 – Resultados comparativos entre laje e cobertura vegetal

Variações máximas, mínimas e valores comparativos em °C e g/m³						
Temperaturas	Valores máximos		Valores mínimos		Valores médios	
	Absoluto	Variação	Absoluto	Variação	Absoluto	Percentual
Protótipo 01	24,79 ^o	19,04 ^o	18,66 ^o	21,71 ^o	21,03 ^o	3,81%
Protótipo 02	24,4 ^o	21,33 ^o	20,57 ^o	21,71 ^o	21,86 ^o	
Externas	27,52 ^o	18,66 ^o	28,28 ^o	22,86 ^o	21,57 ^o	-
Umidade Absoluta						
Protótipo 01 (g/m ³)	16	11,6	12,2	12,4	13,63	1,16%
Protótipo 02 (g/m ³)	16	13,7	12,2	12,4	13,80	
Externas (g/m ³)	16,1	11,3	10,9	12,3	13,53	-

Os valores da diferença entre as medições nas coberturas com telhamento e vegetal são apresentados na Tabela 18. As temperaturas e umidades do protótipo 01 são próximas aos valores obtidos no aparelho externo. Assim, pode-se observar uma melhoria no desempenho higrotérmico do protótipo 02, conferido pela cobertura vegetal.

5.2.4. Verificação de desempenho entre cobertura vegetal e fibrocimento

Entre os dias 11 e 13 de outubro de 2007, foram obtidos os valores higrotérmicos na cobertura vegetal e na cobertura com telhas de fibrocimento. As medições ocorreram logo após a construção da cobertura de fibrocimento, conforme descrito no item “h” do capítulo 4.2.

Essas medições seguiram os padrões já utilizados nas duas medições anteriores, com uma pequena modificação, retirando os dois pontos externos do HOBO® 03 que mediam o processo de estratificação do ar dentro do protótipo com cobertura vegetal.

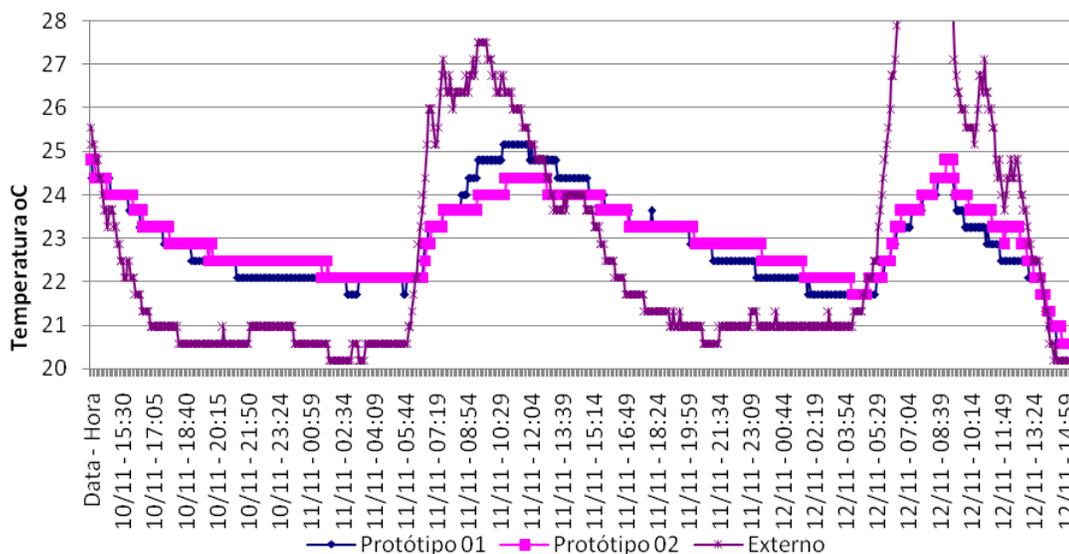


Gráfico 12 - Medições comparativas de temperatura entre telhamento e cobertura vegetal

O Gráfico 12 mostra as medições de temperaturas dos protótipos, podendo se observar uma pequena diferença entre o desempenho térmico. No período entre o início das medições até as 7h da manhã. No dia 13 de outubro, a cobertura vegetal apresentou uma melhor resistência e atraso térmico, com uma diferença entre a temperatura na crista da primeira curva de $1,16^{\circ}\text{C}$, ou seja 4,61%. Na situação de fluxo de calor ascendente, a cobertura vegetal também se manteve melhor em relação à outra, com $0,39^{\circ}\text{C}$ a mais nas temperaturas mais baixas localizadas no vale da curva.

No dia 13, ao chegar perto das 11h ocorreu uma drástica diminuição da temperatura, causada por uma frente fria, fazendo diminuir a temperatura de 31°C para 19°C .

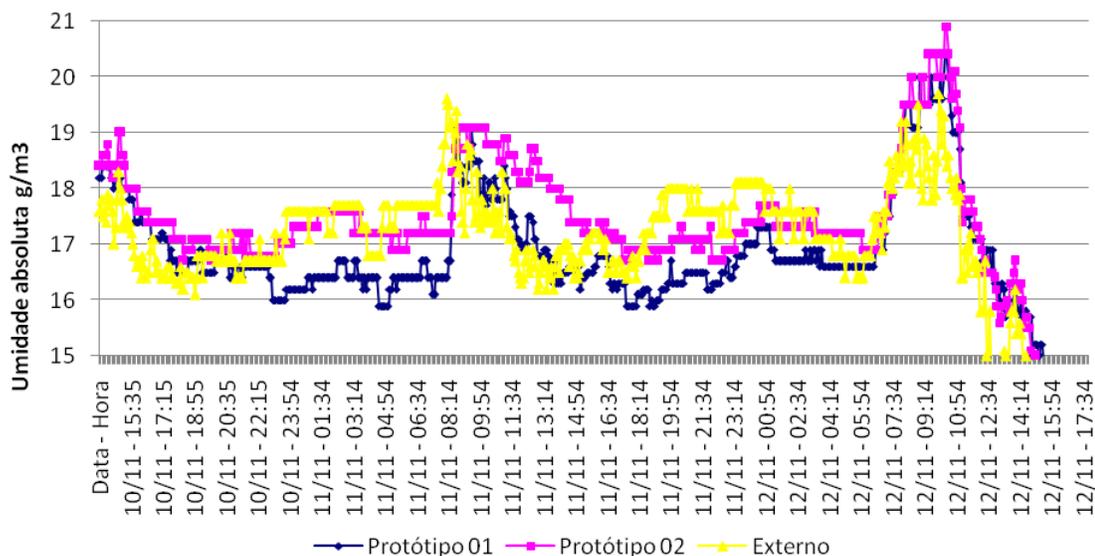


Gráfico 13 - Medições comparativas de umidade absoluta entre telhamento e cobertura vegetal

As medições de umidade absoluta do Gráfico 13 mostram uma grande diferença, com valores ora maiores para cobertura vegetal ora maiores para a de fibrocimento. A maior diferença se deu às 13h e 50min do primeiro dia de medição, com $1,7\text{g/m}^3$, ou 9,44% a mais no protótipo 02, que apresentou uma menor troca entre o ambiente externo e interno.

Por muitas vezes, as temperaturas do telhado de fibrocimento mantiveram-se abaixo da cobertura vegetal, mas com o aumento da umidade externa, a umidade absoluta no seu interior acompanhou esse aumento, igualando-se ao da cobertura vegetal, cuja curva não acompanhou exatamente os movimentos da curva de umidade absoluta externa. Essa relação mostra que a cobertura de fibrocimento oferece uma maior troca com o ambiente externo, como na medição anterior entre laje e cobertura vegetal.

Nessa medição, a cobertura vegetal não mostra uma grande vantagem de desempenho higrotérmico em relação a telhados com fibrocimento. Uma pequena vantagem durante o período de céu aberto, logo desfeita pela ação de ventos e a queda de temperatura externa.

Tabela 19 – Resultados comparativos entre telhamento e cobertura vegetal

Variações máximas, mínimas e valores comparativos						
Temperaturas	Valores máximos		Valores mínimos		Valores médios	
	Absoluto	Variação	Absoluto	Variação	Absoluto	Percentual
Protótipo 01	25,17 ^o	25,17 ^o	20,19 ^o	24,79 ^o	22,89 ^o	0,36%

5 – Análise de Desempenho Térmico

Protótipo 02	24,79 ^o	24,01 ^o	20,19 ^o	24,79 ^o	22,97 ^o	
Externas	32,76 ^o	26,73 ^o	19,42 ^o	27,52 ^o	22,81 ^o	-
Umidade Absoluta						
Protótipo 01 (g/m3)	20,4	16,3	13	18,4	16,71	3,24%
Protótipo 02 (g/m3)	20,90	18	12,9	18,4	17,27	
Externas (g/m3)	19,7	16,2	12,5	17,7	16,94	-

Segundo a Tabela 19, pode-se perceber o melhor desempenho térmico da cobertura vegetal, tanto nas amplitudes térmicas quanto médias, demonstrando que a cobertura vegetal tem maior capacidade de manter o calor durante os períodos em que o fluxo de calor é ascendente, ou seja, de perda de calor. Nos valores para variação mínima em vários momentos, as temperaturas se igualam; porém nunca com a escala de aumento ou diminuição igual.

Tabela 20 - Comparação entre os sentidos dos fluxos de calor

Sistema de cobertura	Laje de Concreto			Telhas de fibrocimento		
	Morais	Lima	Autor	Morais	Lima	Autor
Fluxo de calor ascendente	1,2 ^o C	1,4 ^o C	1,9 ^o C	-	1,2 ^o C	0,4 ^o C
Fluxo de calor descendente	3,8 ^o C	5,9 ^o C	0,4 ^o C	-	1,8 ^o C	0 ^o C

Comparando-se os desempenhos térmicos realizados em coberturas com estudos anteriores, elaborados por Moraes (2003) e Vecchia *et al* (2006), mostra-se na Tabela 20, a diferença entre as temperaturas obtidas com a cobertura vegetal. Nos três estudos realizados no Brasil, não se obteve similaridade, pois as diferenças entre os protótipos analisados são consideráveis, como a localização, a diminuição da espessura de substrato e os materiais empregados na construção. Isso demonstra que a escolha de um sistema de cobertura vegetal mais leve, com menos substrato, deve-se levar em consideração os fatores como peso e desempenho térmico.

5.2.5. Verificação do processo de estratificação do ar no interior dos protótipos

Juntamente com as medições de temperatura, também foram obtidos dados das condições internas do protótipo 02, posicionando os medidores nas

alturas de 0,20m, 1,22m, 2,25m, conforme Figura 69. As medições nessas alturas têm por objetivo demonstrar o processo de estratificação do ar no protótipo nos diferentes sistemas de coberturas.

a) **Na cobertura com laje de concreto:** os valores de temperatura indicam o processo de estratificação do ar para laje de 5cm, com forro em PCM de 2,5cm e sem impermeabilização, apresentados no Gráfico 14.

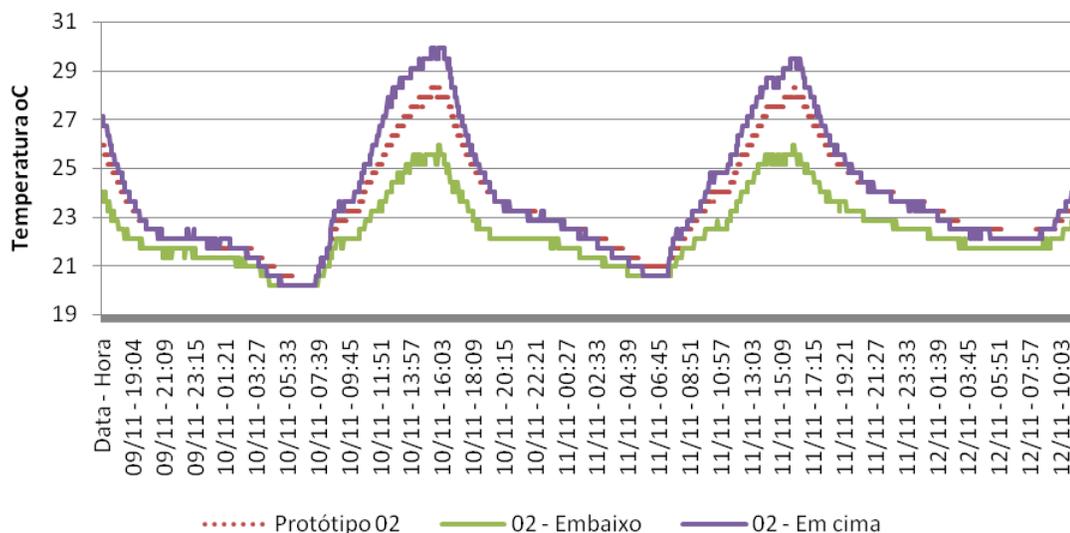


Gráfico 14 – Temperaturas no interior do protótipo 2, demonstrando o processo de estratificação do ar com cobertura de laje

Pode-se notar que durante o período de fluxo de calor descendente, a temperatura é maior no ponto de medição superior e menor no inferior. Já durante o período de fluxo de calor ascendente, todas as temperaturas tendem a se igualar, aproximadamente às 6h da manhã.

Os valores máximos da diferença entre as temperaturas ocorreram às 16h e 40min do dia 12 de setembro de 2007, com 4,7°C ou 16,15% de diferença entre a medição do ponto inferior e do superior. A diferença entre os três pontos foi de 3,12°C, do inferior para o do centro, e de 1,58°C, do centro para o superior.

b) **Na cobertura vegetal:** no Gráfico 15, é possível verificar as diferentes temperaturas obtidas nos pontos citados anteriormente no interior do protótipo 02.

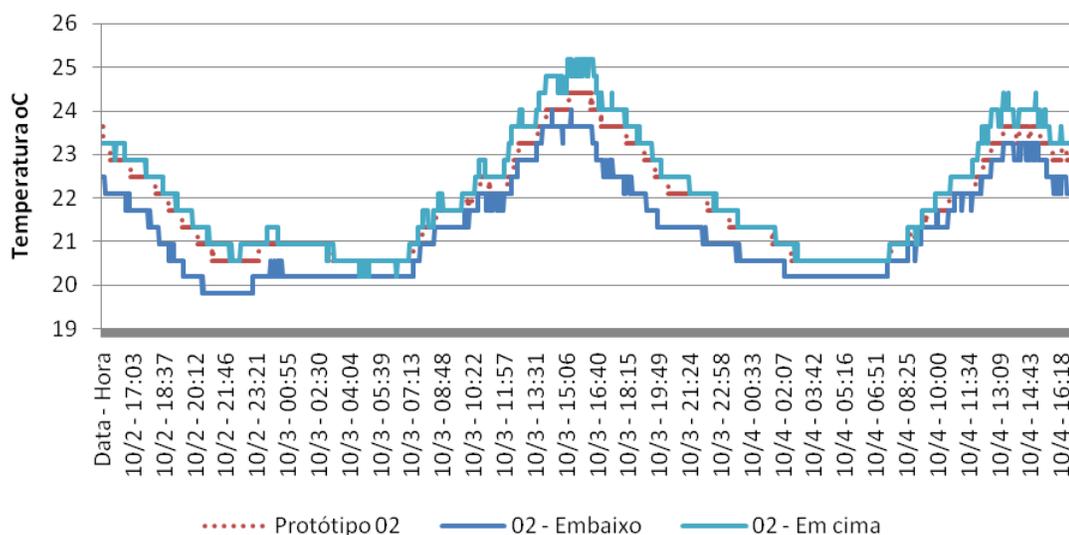


Gráfico 15 – Temperaturas no interior do protótipo 2, demonstrando o processo de estratificação do ar com cobertura vegetal

Como no caso anterior, o ganho de carga térmica pela cobertura durante o período de fluxo de calor descendente é maior no ponto superior e menor no inferior. Já durante o período de fluxo de calor ascendente, a cobertura tende a perder menos calor para o ambiente externo através da maior resistência térmica e, conseqüentemente, da menor transmitância térmica.

Pode-se notar uma redução na amplitude de temperaturas, pois nas medições para a laje de concreto foram de aproximadamente 9°C e as da cobertura vegetal de 5°C. Os valores máximos da diferença ocorreram às 18h e 6min do dia 03 de outubro, com 1,92°C, ou 8 % de diferença entre o a medição de baixo com a de cima. A diferença entre os pontos de baixo para o do meio e o do meio para o de cima foram de 1,54°C e 0,38°C, respectivamente.

Pretendia-se, também, obter as medições relacionadas à cobertura com telhamento em fibrocimento; porém, com os fortes ventos do último sábado do mês de outubro, ocorreu o destelhamento do protótipo 01, quebrando todas as telhas no chão.

6. CONCLUSÕES

Um dos requisitos para o começo da pesquisa foi o de saber o “estado da arte”, ou seja, o histórico das coberturas vegetais no mundo e no Brasil, bem como, os estudos realizados para o desenvolvimento desse sistema construtivo e a quantificação de seu desempenho. Através das pesquisas bibliográficas, verificou-se que, em países da comunidade européia, principalmente na Alemanha, havia pioneirismo no emprego desse sistema cobertura. Na América, os canadenses e americanos já dispõem de tecnologias suficientes para a aplicação desse sistema construtivo vindas da Europa. No Brasil, ainda existem poucas instituições que pesquisam e desenvolvem a cobertura vegetal.

No detalhamento do projeto dos protótipos, levaram-se em consideração os insumos locais e a disponibilidade de materiais na região. O sistema construtivo de cobertura vegetal se mostrou como uma opção viável para a região de Florianópolis. A vegetação transplantada do próprio local para a cobertura se estabilizou rapidamente, atingindo a 0,8m de altura em períodos com bastante sol e regimes de chuvas intercalados.

A utilização das placas de PCM para a construção dos protótipos possibilitou rapidez no corte e montagem das vedações, diferentemente da concretagem da estrutura e seu tempo de cura. O revestimento externo não foi argamassado por questões de custos, mas a sua execução foi facilitada pelas características da superfície da placa de PCM, com poros e completamente planas, podendo diminuir a espessura do reboco. Nas juntas entre os painéis, foi necessária a colocação de telas metálicas que resistissem às trincas.

Nas medições de temperatura, estabeleceram-se condições de controle em cada uma das etapas: de verificação de uniformidade entre os medidores, verificação da uniformidade dos protótipos, medições comparativas entre laje de concreto e cobertura vegetal e medições comparativas entre telhamento de fibrocimento e cobertura vegetal. Os resultados obtidos possibilitaram a análise comparativa de desempenho higrotérmico dos protótipos construídos. Observou-se que a cobertura vegetal apresentou certa redução das amplitudes térmicas em relação ao telhamento de fibrocimento ventilada.

6.1. QUANTO AOS MÉTODOS UTILIZADOS

A localização e a orientação dos protótipos foram escolhidas para igualar a exposição à radiação solar. Porém, notou-se que, durante períodos com ventos muito fortes, principalmente os de quadrante Sul e Norte, os ventos interferem nas medidas de temperatura no interior dos protótipos. Como os ventos do quadrante Sul são normalmente mais frios e atuam de forma mais intensa no protótipo 02, esse apresenta maior perda de calor para o ambiente externo, funcionando como uma barreira para o protótipo 01. Desse modo, observou-se que os protótipos apresentam a mesma exposição à radiação solar; porém, não a mesma exposição aos ventos.

Quanto ao uso dos equipamentos, verificou-se que a precisão das medições é compatível com as margens de erro especificadas pelo fabricante e, por ser pequena, foi desconsiderada. Não houve como medir simultaneamente a estratificação do ar junto ao desempenho higrotérmico no interior dos protótipos, pois só havia um aparelho com dois pontos externos.

Ao adotar a altura de 2,60m no interior do protótipo, observou-se a predominância das superfícies de fachada com relação à cobertura. As dimensões dos protótipos, mesmo reduzidas por motivos econômicos, permitiram uma aproximação das condições reais de uma edificação.

6.2. QUANTO AO SISTEMA CONSTRUTIVO DO PROTÓTIPO

Na montagem dos protótipos, observou-se a dificuldade em controlar as juntas entre as placas de vedações verticais. Após a colocação das placas externas das fachadas norte e sul, procedeu-se à colocação das placas internas. Durante esse processo, as placas internas necessitaram de cortes especiais de 5mm nas placas laterais, a fim de se ajustarem às dimensões estabelecidas em projeto.

A concretagem das lajes radier, pilares, vigas e lajes de coberturas foram as etapas mais dispendiosas pelo preparo do concreto em obra. O uso de concreto usinado permitiria maior rapidez na construção dos protótipos e superfícies mais regulares.

As espessuras das paredes adotadas no projeto consideram a dimensão mínima de 12cm para pilares de concreto, especificado pela NBR 6128. Como neste

projeto considerou-se a placa de PCM como fôrma incorporada, as paredes têm 17cm de espessura. Se houvesse aplicação de um revestimento argamassado, a espessura da parede teria 20cm, com 5cm a mais de uma parede comumente utilizada na região com blocos cerâmicos.

6.3. QUANTO AO SISTEMA COBERTURA VEGETAL UTILIZADO

A solução utilizada para o sistema de cobertura vegetal foi o de laje impermeabilizada com manta aluminizada, protegida por manta geotêxtil e recoberta com argila expandida e areia grossa. Essa solução construtiva possibilitou a drenagem de modo satisfatório, porém com reduzida retenção de água na cobertura. A quantidade de água absorvida não foi suficiente para manter, durante o período de estiagem, a umidade necessária para conservar o vegetal. No mês de janeiro de 2008, com pouco volume de chuva, a vegetação selecionada ficou bastante ressecada. Entretanto, após um período de chuvas intercaladas, rapidamente a vegetação se restabeleceu. Esse fenômeno seria minimizado com o aumento da camada de argila expandida, garantindo maior volume de retenção de água, adicionando pouco peso no sistema estrutural.

A camada de substrato, colocada sobre a argila expandida, contém terra do próprio local, incorporada na leiva da vegetação, com areia preenchendo os espaços e regularizando a camada de argila expandida e do próprio vegetal. Isso permitiu aumentar a retenção de água no vegetal, facilitando a penetração da água da chuva, sem o carreamento do substrato.

A vegetação utilizada apresenta uma variedade de espécies que já se encontravam adaptadas às condições existentes no local. Essa rusticidade dispensou grandes cuidados quanto à manutenção da vegetação, através de irrigação e fertilização do solo.

6.4. QUANTO AO DESEMPENHO HIGROTÉRMICO DOS PROTÓTIPOS

Nos testes de aferição dos equipamentos de medição higrotérmicos, as variações observadas encontram-se dentro dos valores admitidos pelo fabricante. Em relação aos protótipos, observou-se que houve similaridade nas curvas dos gráficos, com uma diferença percentual média de 4,38% para temperatura e 3,95%

para umidade absoluta. Embora apresentassem uniformidade nos valores, procedeu-se ao selamento de algumas frestas com espuma de poliuretano e proteção dos vãos de abertura das portas, reduzindo a entrada de ar externo.

Nas medições comparativas entre as coberturas dos protótipos, pôde-se perceber o melhor desempenho térmico da cobertura vegetal, tanto nas amplitudes térmicas quanto médias, demonstrando que a cobertura vegetal tem maior capacidade de manter o calor durante os períodos em que o fluxo de calor é ascendente, ou seja, de perda de calor do protótipo.

Pôde-se observar que as placas de PCM contribuíram para melhorar desempenho térmico, exemplificado pelos cálculos de desempenho realizados através da NBR 15.220. Segundo essa norma, o valor de condutividade térmica do material é de $0,15 \text{ W/(m.K)}$, próximos aos valores de condutividade em materiais reconhecidamente com bom desempenho térmico, como o caso do concreto celular autoclavado, que é de $0,17 \text{ W/(m.K)}$. Desse modo, o forro contribuiu para amenizar ainda mais as variações de temperaturas no ambiente interno dos protótipos.

A transmitância térmica da cobertura vegetal, mesmo em se considerando como última camada a terra sem vegetação, apresentou valores aproximadamente 10% superiores ao da transmitância térmica da cobertura com telhas de fibrocimento. Na situação com fluxo de calor ascendente, essa diferença triplicou, pois o modelo teórico desconsidera a última camada nessa situação, em coberturas muito ventiladas. Entretanto, nas medições realizadas nos protótipos, essas diferenças de desempenho térmico não foram tão acentuadas. A maior diferença entre as temperaturas máximas nos protótipos foi de 4,61%. Esse diferencial entre os desempenhos teóricos e o modelo se deve ao fato de as temperaturas internas serem influenciadas por toda a envolvente do protótipo e não apenas pelos valores de transmitância das coberturas.

Outros fatores podem ter influenciado o comportamento dos protótipos, tais como a perda de calor pela incidência diferenciada de ventos, a variação da inércia térmica pela retenção de água e a evapotranspiração da água na camada vegetal.

Como observado anteriormente, a quantidade de água no sistema de cobertura vegetal influencia o desempenho térmico. A grande dificuldade é estabelecer as relações entre a quantidade de água existente e as variações de temperatura e umidade nos ambientes internos dos protótipos. As medições de

umidade no interior do protótipo com cobertura vegetal foram em média 3,2% superior aos valores do protótipo com cobertura de fibrocimento. Isso se deve à maior capacidade da cobertura vegetal de manter as temperaturas e umidades constantes no interior do protótipo.

Comparando as medições obtidas neste trabalho com outros estudos similares realizados, observou-se que as diferenças são significativas, provavelmente, em função da diferença entre os sistemas construtivos dos protótipos, da cobertura vegetal e da localização. Além das variações das camadas de substrato e da cobertura vegetal, destacou-se a contribuição no uso das placas de PCM como fôrma e forro da laje de cobertura, melhorando o desempenho térmico dos protótipos construídos na UFSC.

6.5. SUGESTÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A partir das experiências adquiridas no desenvolvimento desta dissertação, apresentam-se algumas recomendações para trabalhos futuros de desempenho higrotérmico de coberturas vegetais. Também são sugeridos alguns temas para trabalhos futuros no sentido de se aprofundarem os estudos aqui observados:

- comparação entre diferentes sistemas de coberturas vegetais, variando as espessuras das camadas de substrato, diferentes sistemas de retenção de água e adoção de diferentes espécies de vegetal;
- medições ao longo de um ano inteiro, a fim de verificar o desempenho higrotérmico nas quatro estações;
- instrumentação em maior número de pontos no protótipo com o objetivo de avaliar temperatura e umidades nas distintas camadas da cobertura;
- medição de temperatura nas coberturas com e sem as placas de PCM, com a finalidade de avaliar sua contribuição no conjunto;
- medições de retenção de água em diferentes sistemas de cobertura, bem como em diferentes sistemas de coberturas vegetais;
- medições de fluxo de calor na cobertura vegetal;
- medições de edifícios com coberturas vegetais em uso.

Referências

AMBIENTE BRASIL. "Glossário Ambiental". Disponível em:
< <http://www.ambientebrasil.com.br>>. Acesso em: 09 de agosto de 2006.

ARAÚJO, P. R; TUCCI, C. E. M; GOLDENFUM, J. A. "Avaliação da eficiência dos pavimentos permeáveis na redução de escoamento superficial". **Revista brasileira de recursos hídricos** – RBRH, Porto Alegre, v. 5, n.3, p.21-29, jul./set. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR 15.220**: Desempenho Térmico de Edificações - Parte 1: Definições, símbolos e unidades. Rio de Janeiro. Abril, 2005.

_____**ABNT. NBR15.220**: Desempenho Térmico de Edificações - Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro. Abril, 2005.

_____**ABNT. NBR15.220**: Desempenho Térmico de Edificações - Parte 3: Zoneamento bioclimático brasileiro e diretrizes construtivas para habitações unifamiliares de interesse social. Rio de Janeiro. Abril, 2005.

_____**ABNT. NBR6.123**: Forças devidas ao vento em edificações. Rio de Janeiro. Junho, 1988.

_____**ABNT. Projeto 02:136.01.007**: Desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro. Setembro, 2007.

_____**ABNT. Projeto 02:136.01.007**: Desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos – Parte 5: Coberturas. Rio de Janeiro. Setembro, 2007.

BARRY, P.J. "Avaliação acústica de parede". São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, 2005. 4 p.(Laudo técnico).

BEUTH VERLAG. **DIN EN 12.056**: *Gravity drainage systems inside buildings - Part 2: Sanitary pipework, layout and calculation*. Berlin. Jan., 2001.

BRUAND, Y. **Arquitetura Contemporânea no Brasil**. 4.ed. São Paulo: Editora Perspectiva, 1984.

- COLLINS, P. "*Green Roofs and Earth Sheltered Buildings*". Disponível em: <<http://construction.ntu.ac.uk/staffwebs/greenroofs/aboutNoPics.htm>>. Acesso em: 10 de julho de 2005.
- CRIT – *Centre de Ressources et d'informations Tequinics*. "*Toiture: la couverture se met au vert*". Disponível em: <<http://www.crit.archi.fr/produits%20innovants/FICHES/Fiche1/presentation.html>>. Acesso em: 10 de outubro de 2006.
- DA CUNHA, A. P. S. R. "Experimento hidrológico para aproveitamento de água de chuva usando coberturas verdes leves (CVL)". São Carlos: USP, 2004. 41 p. (Projeto de Pesquisa, FAPESP 03/06580-7).
- DEL BARRIO, E. P. "*Analysis of the green roofs cooling potential in buildings*". Disponível em: *Science Direct*, 1998. *Energy and Buildings*, vol.27, livro 2. p.179-193.
- DUNNET, N; KINGSBURY, N. ***Planting green roofs and living walls***. Portland, Oregon: Tiber Press, 2004.
- DÜRR, A. ***Dachbegrünung***. Bauverlag: Wiesbaden, 1995.
- EARTHPLEDGE. "*Green Roofs*". Disponível em: <<http://www.earthpledge.org/gr/>>. Acesso em: 17 de junho de 2007.
- ECOTELHADO. "Ecotelhado". Disponível em: <<http://www.ecotelhado.com.br>>. Acesso em: 15 de julho de 2006.
- EMILSSON, T. "*Extensive vegetated roofs in Sweden*". 2006. 34 f. *Dissertação (Faculty of Landscape Planning, Horticulture and Agricultural Science) – Swedish University of Agricultural Science, Uppsala*, 2005.
- EVERT, K. J. "*Municipal incentives for Green roofs*". *International Green Roof Congress*, 2004. Disponível em: <http://www.greenroofworld.com/EN/referate_warum_begrueung.php>. Acesso em: 02 de março de 2006.

GALINSKY. "Villa Savoye". Disponível em: <<http://www.galinsky.com/buildings/savoye/>>. Acesso em: 15 de janeiro de 2008.

GLANCEY, J. **A História da Arquitetura**. São Paulo: Loyola, 2001.

GÜTHS, S. "Relatório de medição de condutividade térmica". Florianópolis: Laboratório de Meios Porosos e Propriedades Termofísicas de Materiais, 2006. 2p.

J-DRain GRS. "*Green Roof Drainage System*". *J-DR Enterprises, Inc.* Manual técnico do fabricante. Disponível em: <<http://www.j-drain.com>>. Acesso em: 13 de setembro de 2006.

KATZSCHNER, L. ***Ergebnisse des Versuchs zur Abflubmessung eines Grasdachs***. Universidade de Kassel, 1991.

KÖHLER, M; SCHIMDT, M; GRIMME, F. W; LAAR, M; GUSMÃO, F. "*Urban Water Retention by Greened Roofs in Temperate and Tropical Climate*". Singapore, 2001. 38th International Federation of Landscape Architects - World Congress.

KÖHLER, M; SCHIMDT, M; LAAR, M. "*Roof Gardens in Brazil*". Rio de Janeiro, 2003. RIO 3 - World Climate & Energy Event.

LAAR, M.; SOUZA, C. G; DE ASSUNÇÃO PAIVA, V. L; AUGUSTA DE AMIGO, N; TAVARES, S; GUSMÃO, F; GRIMME, F. W; KÖHLER, M; SCHIMDT, M. "Estudo de aplicação de plantas em telhados vivos extensivos em cidades de clima tropical". São Pedro, SP, Brasil, 2001. IV Encontro Nacional e III Encontro Latino-Americano sobre Conforto do Ambiente Construído.

LAMBERTS, R; DUTRA, L; PEREIRA, F. O. R. **Eficiência Energética na Arquitetura**. São Paulo: PW, 1997.

LIU, K.K; BASKARAN, B. "*Thermal performance of green roofs through field evaluation*". Chicago, 2003. *Proceedings of the First North American Green Roofs Infrastructure Conference*.

LOHMANN, A; BARTH, F. "Coberturas Vegetais como Solução para Habitação de Interesse Social". Florianópolis, 2006. 2º International Congresso Brasileiro e Ibero-Americano de Habitação Social, Ciência e Tecnologia.

LOIPETSBERGER, H. *“Die Brasilianisierung der Moderne_Beginn der Ära Burle Marx”*. Disponível em:
<http://rbm.yummy.at/de/20_LA_brasil/24_Brasilianisierung/>. Acesso em: 20 de março de 2005.

LORENZI, H; SOUZA, H. M. de. **Plantas ornamentais no Brasil**: arbustivas, herbáceas e trepadeiras. 2.ed. São Paulo: Nova Odessa, 1999. 1918p.

LÖTSCH, B. *“Stadtklima um Grün”*. Andrtzky, Spitzer (ed): *Grün in der Stadt*. Reinbek 1981, p.134-153

MARK HARDEN'S ARTCHIVE. *“The Artchive”*. Disponível em:
<http://www.artchive.com/artchive/h/hundertwasser/hundertwasser_house.jpg>. Acesso em: 12 de julho de 2006.

MICHIGAN STATE UNIVERSITY. *“Green Roof Research Program”*. Disponível em:
<<http://www.hrt.msu.edu/greenroof/>>. Acesso em: 23 de julho de 2006.

MINKE, G. *“Inclined green roofs - ecological and economical advantages and passive heating and cooling effect”*. Florianópolis, SC. 2001. p. 133-136. *International Conference on Passive and Low Energy Architecture*, 18, Florianópolis, 2001. Anais.

MINKE, G. **Techos verdes**: *planificación, ejecución, consejos prácticos*. Montevidéo: *Fin de Siglo*, 2004. 85 p.

MORAIS, C. S. *“Desempenho térmico de coberturas vegetais em edificações na cidade de São Carlos – SP”*. 2004. 100 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2004.

MORAIS, C. S; RORIZ, M. *“Thermal performance of green roofs: a case study in a tropical region”*. Santiago, 2003. *The 20th Conference on Passive and Low Energy Architecture*.

Onset Computer Corporation. *“HOBO@ H8 Family: User's Manual”*. Disponível em: <http://www.onsetcomp.com/support/manual_pdfs/loggers/2016_G_MAN_HO8.pdf>. Acesso em: 09 de agosto de 2007.

OSMUNDSON, T. *Roof Gardens: history, design and construction*. Nova Iorque, 1999. W. W. Norton and Co.

PECK, S.W; CALLAGHAN, C. *“Greenbacks from green roofs: forging a new industry in Canada”*. Canadá, 1999.

PENNIGSFELD *et all.* *“Prüfung verschiedener Wurzelschutzbahnen für Dachgärten”*. In *Garten um Landschaft*, caderno 8/1981, p.584-591.

PETERS, K. PETERS, P. “SOD HUT PROJECT”. Disponível em:
< <http://www.mciblues.net/Student%20Life/sodhut.htm>>. Acesso em: 02 de agosto de 2005.

ROSA, D. “O Telhado Ecológico da Serra”. **Diário Catarinense**, Florianópolis, 02 de junho de 2005. Contracapa, p.56.

SCHIEL, D. “O que é ecologia?”
Disponível em: < <http://educar.sc.usp.br/ciencias/ecologia/ecologia.html> >. Acesso em: 12 de julho de 2006.

SCHMIDT, M. *“Rain Water Harvesting / Uso de água da chuva”*. In: *Sustainable Revitalization of Tropical Cities/Revitalização Sustentável de Cidades Tropicais*. Rio de Janeiro/Berlin: Ed. M. Laar & K. Knecht, 2002. 117p.

SILVA, C. R. da. “Laje Jardim e Espaço Urbano”. 2003. 123f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

TACLA, Z. **O livro da arte de construir**. São Paulo: Unipress Editorial Lda. , 1984.

TREBILCOCK, M. E. *“Appropriate technologies for the design of green roofs”*.. In: São Paulo: NUTAU, 1998. 7p. (Artigo técnico).

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia. Ciência e Aplicação**. São Paulo (SP): EDUSP, 2001.

ULTRICH, R. *“Human responses to vegetation and landscapes”*. *Landscape and Urban Planning*, 1986. p.29-44.

VECCHIA, F. “Cobertura Verde Leve (CVL): Ensaio experimental”. Maceió, 2005. Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído – VIII ENCAC e IV ENLACAC.

VECCHIA, F; LIMA, M. P; ARANTES, D. "Avaliação do comportamento térmico de coberturas verdes leves (CVLs)". Disponível em:
<<http://www.shs.eesc.usp.br/pessoal/docentes/docente.asp?docente=14>>. Acesso em: 06 de setembro de 2006.

WEBSHOTS. "Elysea100's Collection". Disponível em:
<http://www.webshots.com/collections/winter/winter_p247.html>. Acesso em: 02 de junho de 2005.

ZinCo. "*Flat Roofing and waterproof Systems*". Disponível em: <<http://www.alumasc-exteriors.co.uk/waterproofing/Systems.aspx?systemid=30& section=Brochure#>>. Acesso em: 09 de agosto de 2007.

Referências Complementares

ANDRADE, S. F de. “Estudo de estratégias bioclimáticas no clima de Florianópolis”. 1996.135f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1996.

BARTH, F. “Inovações em Sistemas de Coberturas”. Joinville, 2006. Congresso de Inovação Tecnológica.

CLIMATEX. “Placas Cimentícias de Madeira Mineralizada”. Construção. Disponível em: <[http:// www.climatexforros.com.br/](http://www.climatexforros.com.br/)>. Acesso em: 20 de setembro de 2006.

DENARDO, J. C; JARRETT, A. R; MANBECK, H. B; BEATTIE, D. J; BERGHAGE, R. D. “*Stormwater Detention and Retention Abilities of Green Roofs*”. Philadelphia, Pennsylvania, 2003. *World Water and Environmental Resources Congress*, 2003.

DUARTE, R. B. FORMOSO, M. T. FONSECA, N. D. R. ALMINHANA, F. “Avaliação do Sistema Construtivo MOVIMAX”. Porto Alegre: CIENTEC, 2006. 101 p.

EMILSSON, T. “*The influence of establishment method and species mix on plant cover*”. *Greening Rooftops for Sustainable Communities, Proceedings of the First North American Green Roofs Conference*, Chicago, 2003. Artigo técnico.

GOULART, S. V. G. “Dados Climáticos para Avaliação de Desempenho Térmico de Edificações em Florianópolis”. 1993.124 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1993.

IOSHIMOTO, E. PRADO, R. T. A. “Conforto e Psicrometria”. 2007. (Notas de Aula. PDF).

KÖHLER, M; SCHMIDT, M; GRIMME, F. W; LAAR, M; PAIVA, V. L. de A; TAVARES, S. “*Green roofs in temperate climates and in the hot-humid tropics: far beyond the aesthetics*”. Florianópolis, SC. 2001. p. 493-500. *International Conference on Passive and Low Energy Architecture*, 18, Florianópolis, 2001. Anais.

KOPÁNOV, A. “*Green roofs in the city environment*”. Disponível em: <heja.szif.hu/ARC/CEA-010227-A/cea010227a.pdf>. Acesso em: 03 de março de 2005.

KÜNZEL, H. M; KIEBL, K. “*Moisture Behaviour of Protected Membrane Roofs with Greenery*”. Kyoto, 1997. 7 p. In: CIB W40 Proceedings, Kyoto, 1997. Artigo técnico.

LAAR, M.; GRIMME, F.W. “*Thermal comfort & reduced flood risk through green roofs in the Tropics*”. – Geneva, 2006. *The 19th Conference on Passive and Low Energy Architecture*.

PECK, S; KUHN, M. “*Design Guidelines for Green Roofs*”. Environment Canada. Toronto, 2000.

PHAIDON PRESS. *The House Book*. Inglaterra: Phaidon, 2001.

POUEY, M. T. F; SATTLER, M. A; SCHNEIDER, P. S. “Coberturas Verdes: Análise de Desempenho Térmico”. Florianópolis, SC. 1998. 9p. In: ENTAC, Florianópolis, 1998. Artigo Técnico. 472 – 481.

RIVERO, R. **Arquitetura e clima**: condicionamento térmico natural. 2.ed. Porto Alegre: D. C. Luzzatto, 1986. 240p.

TUCCI, C. E. M. “Plano Diretor de Drenagem Urbana: princípios e concepção”. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, vol.2, n.2, p. 5-12. Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1997.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC. Biblioteca Central. “Como fazer referências bibliográficas, eletrônicas e demais formas de documentos”. Disponível em: < <http://www.bu.ufsc.br>>. Acesso em: 01 de março de 2007.

____UFSC. Biblioteca Central. “Procedimentos para apresentação e normalização de trabalhos acadêmicos”. Disponível em: < <http://www.bu.ufsc.br>>. Acesso em: 01 de março de 2007.

____UFSC. Biblioteca Central. “Citação em Documento”. Disponível em: < <http://www.bu.ufsc.br>>. Acesso em: 01 de março de 2007.

____UFSC. Biblioteca Central. “Manual de Referências”. Disponível em: < <http://www.bu.ufsc.br>>. Acesso em: 01 de março de 2007.

VECCHIA, F; CASTANEDA, G; QUIROA, J. A. “*Aplicación de cubiertas verdes en climas tropicales: Ensayo experimental comparativo con techumbres convencionales. Tecnología y Construcción*”. Caracas - Venezuela, vol.22, nº2, p.9-

13, maio 2006. Disponível em: <http://www2.scielo.org.ve/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0798-96012006000200002&lng=es&nrm=iso>.

VECCHIA, F. *Reacción ante calor em cuatro sistemas de cubiertas*. **Ingeniería Revista Académica**. Mérida - México, ano/vol. 10, p. 17-23, jan./abr. 2006.

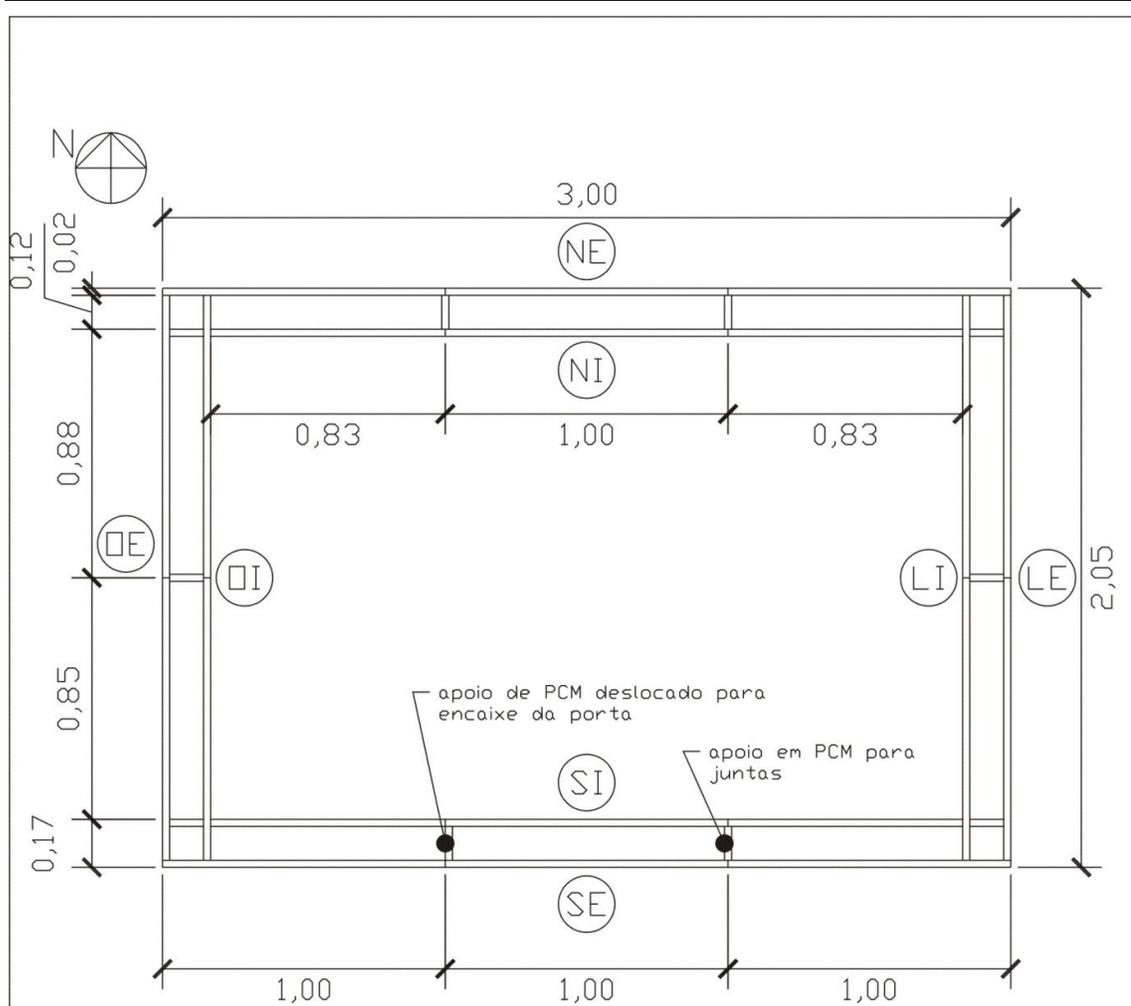
Sites Pesquisados:

http://en.wikipedia.org/wiki/Green_roof
<http://www.gernotminke.de/minke.html>
<http://www.greenroofs.com/>
<http://www.greenroofs.org/>
<http://www.infohab.org.br/>
<http://www.livingroofs.org/>
<http://scholar.google.com.br/>
<http://www.scielo.org>

APÊNDICES

APÊNDICE A

Projeto do protótipo



Planta do protótipo
Escala 1:25

N - norte

S - sul

L - leste

oeste - O

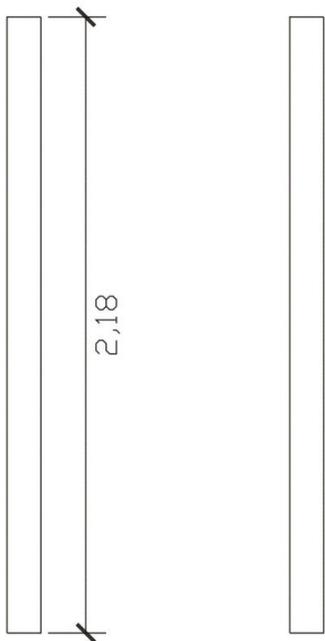
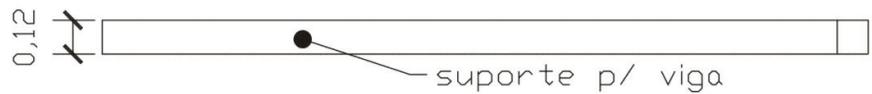
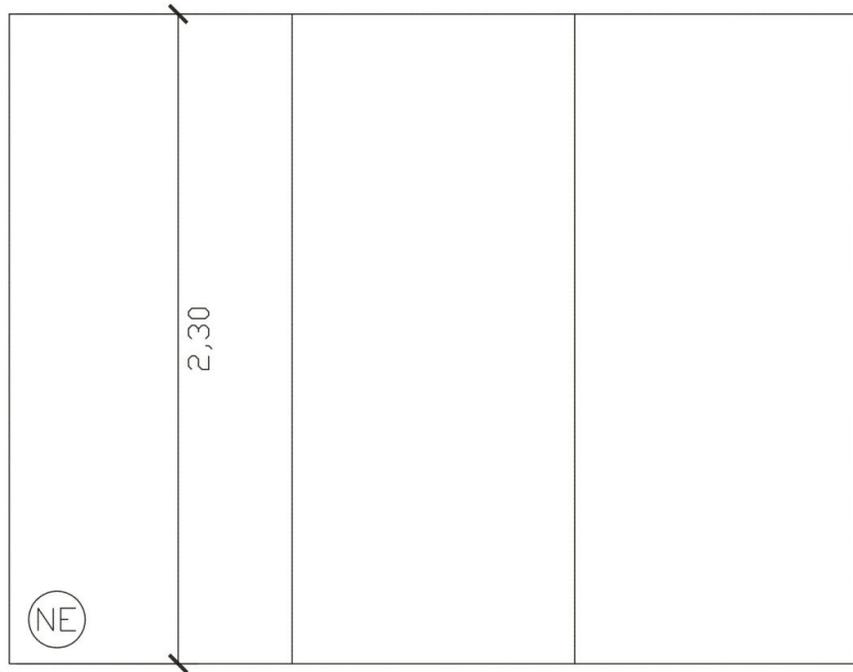
externo - E

interno - I

Para a construção dos dois protótipos serão utilizadas 60 chapas de PCM, 3 m³ de concreto, 300 parafusos dentre outros materiais.

Projeto para montagem dos potótipos, com as medidas das peças e a quantidade necessária

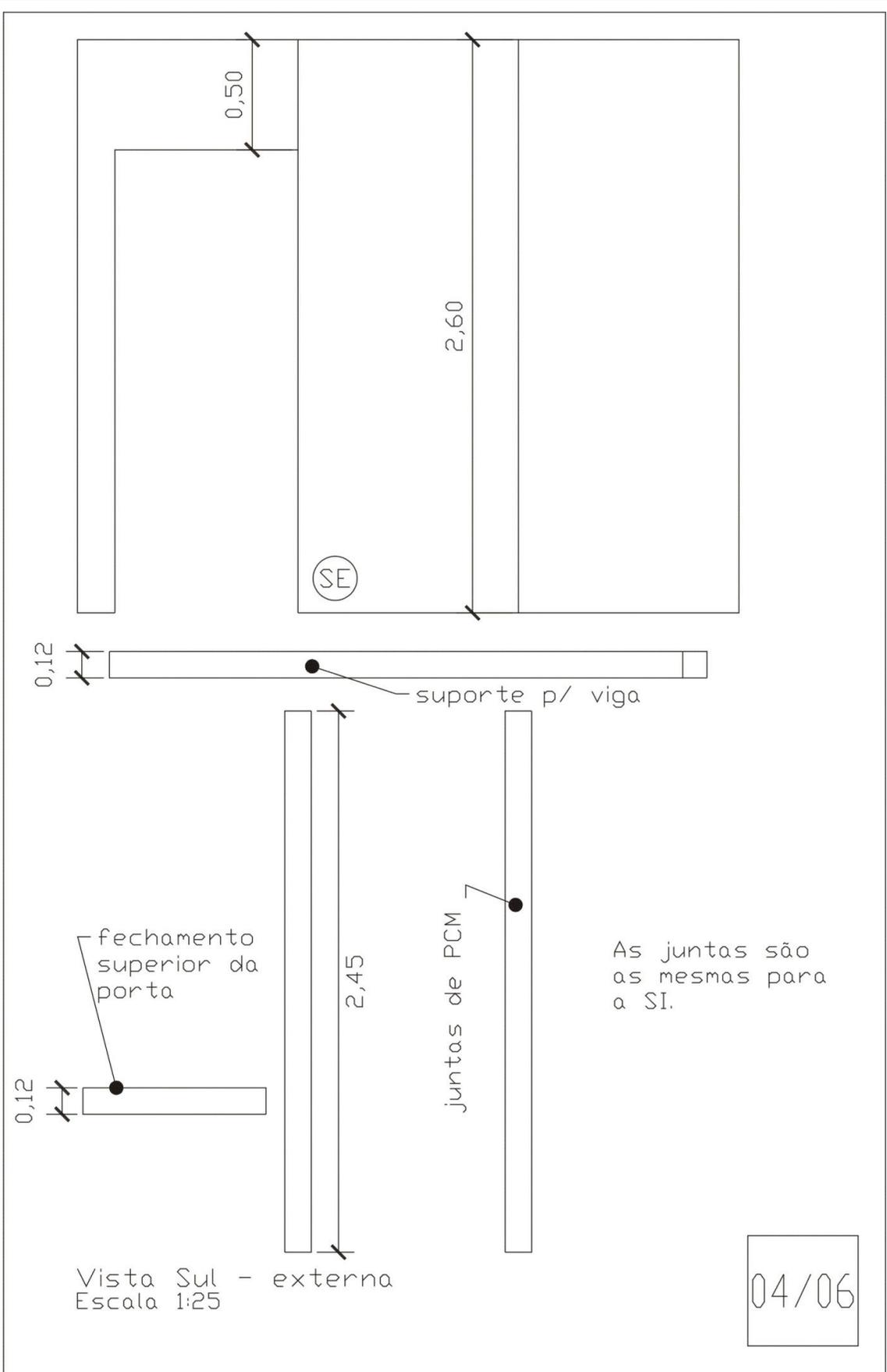
01/06

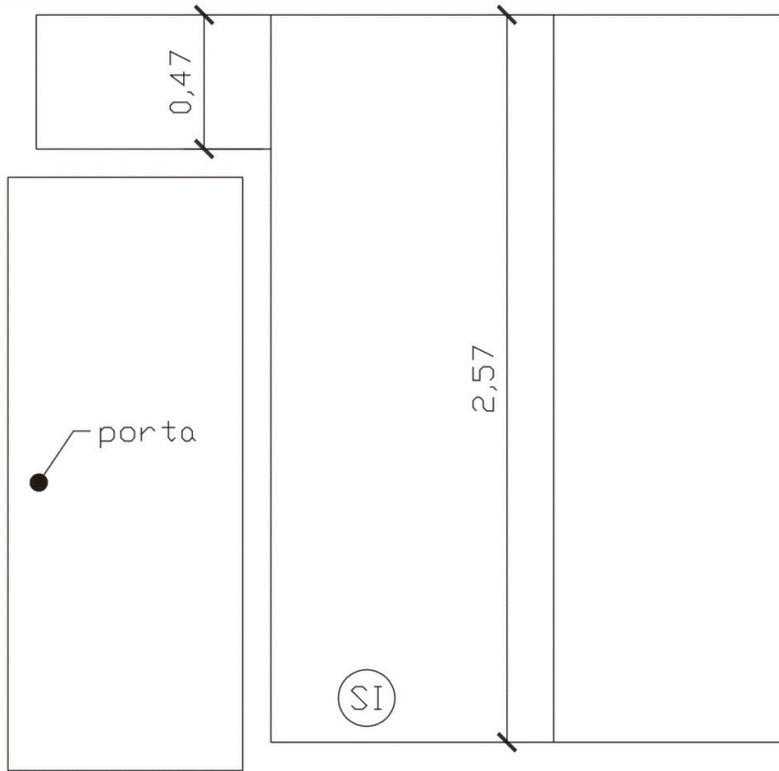


As juntas são as mesmas para a NI.

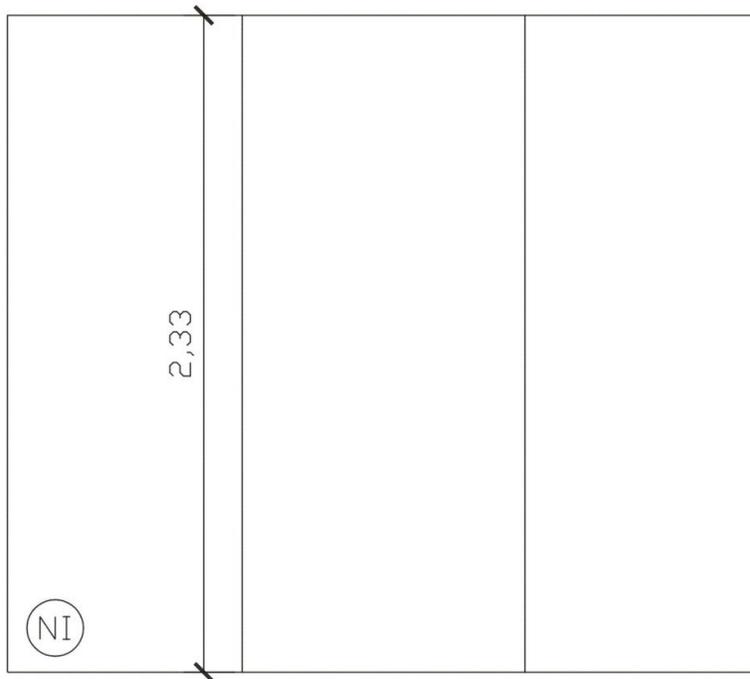
Vista Norte - externa
Escala 1:25

03/06



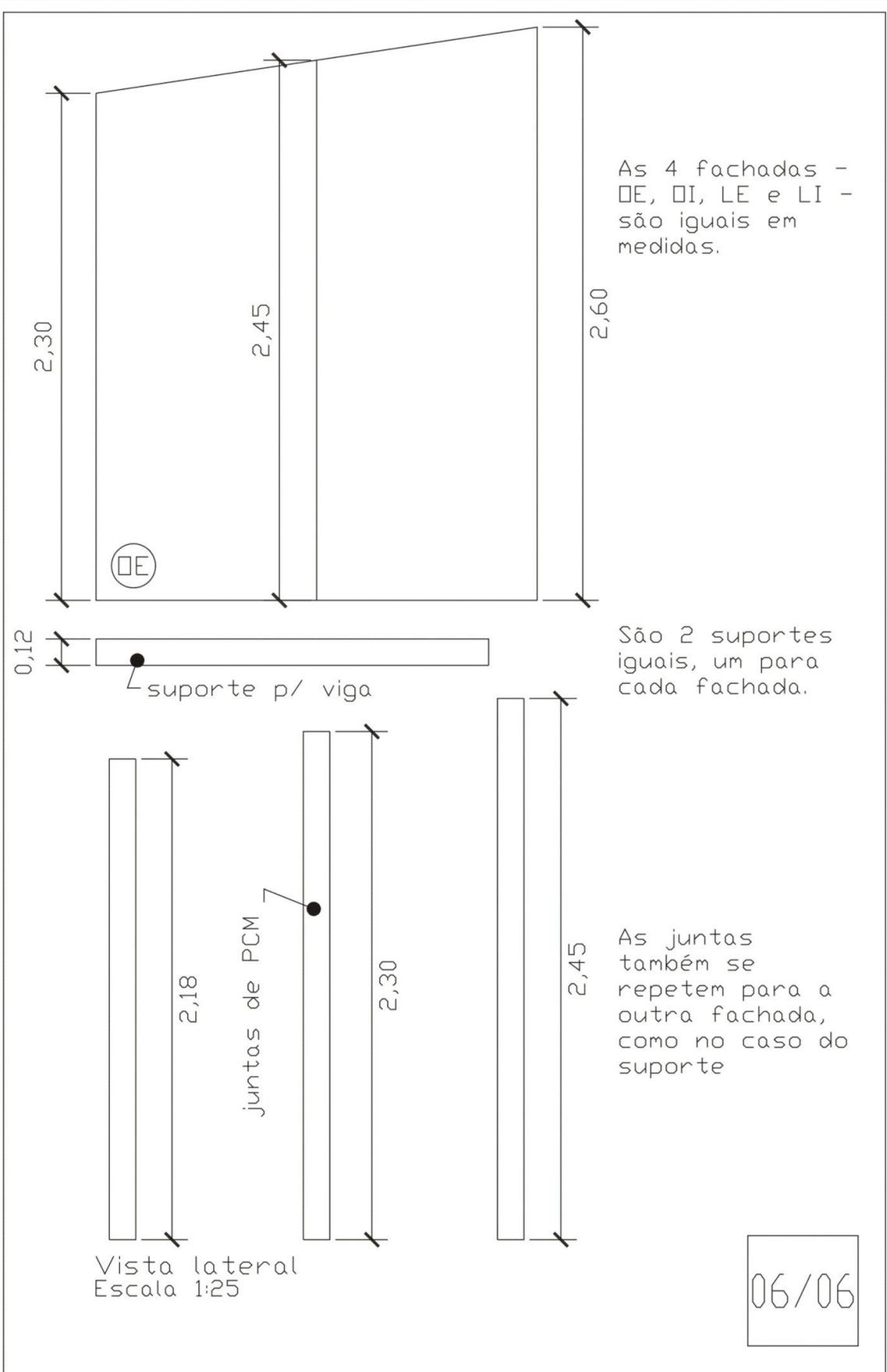


Vista Sul - interna
Escala 1:25



Vista Norte - interna
Escala 1:25

05/06



APÊNDICE B

Tabela de cálculos dos desempenhos térmicos, segundo NBR 15.220

Parede de PCM

	PCM	Reboco
ρ (kg/m ³)	440	1200
λ (W/m.K)	0,15	0,7
c (KJ/kg.K)	2,3	0,84
Espes. (m)	0,025	0,015

Valores rqueridos	
Região 3	Florianópolis
U =	$\leq 3,6$ W/(m ² .K)
ϕ =	$\leq 4,3$ horas
FCS =	$\leq 4,0$ %

Sem painel

	Concreto	Material
ρ (kg/m ³)	2200	
λ (W/m.K)	1,75	
c (KJ/kg.K)	1	
Espes. (m)	0,12	

Seção A	pcm+ar+pcm		Ra
0,817	0,817		0,5033
			Cta 50,6000
Seção B	pcm+pcm+pcm	0,17	Rb
0,025	0,025		1,1333
			Ctb 25,3000
Seção C	pcm+conc+pcm		Rc
0,12	0,12		0,4019
			Ctc 314,6000

	Material	Material
ρ (kg/m ³)		
λ (W/m.K)		
c (KJ/kg.K)		
Espes. (m)		

	Resist. AR
Rsi	0,13
Rse	0,04
α	0,3

Superfície branca - com falhas cinzas

Ar - alta e 0,17

Painel		
Rt =	0,4949	(m ² .K)/W
RT =	0,6649	(m ² .K)/W
U =	1,5040	W/(m ² .K)
CT =	54,92176644	kJ/(m ² .K)
B0 =	54,92176644	
B1 =	25,0803	
B2 =	-19,59118203	
ϕ =	3,4253	horas
FS =	1,8048	%

Cobertura Vegetal plana com laje de concreto

	PCM	Manta Asfáltica
ρ (kg/m ³)	440	1000
λ (W/m.K)	0,15	0,23
c (KJ/kg.K)	2,3	1,46
Espes. (m)	0,025	0,005

Valores requeridos	
Região 3	Florianópolis
U =	$\leq 2,0$
ϕ =	$\leq 3,3$
FCS =	$\leq 6,5$

	Argila Exp.
ρ (kg/m ³)	400
λ (W/m.K)	0,16
c (KJ/kg.K)	
Espes. (m)	0,01

	Barro	Concreto (5cm)
ρ (kg/m ³)	1700	2200
λ (W/m.K)	0,52	1,75
c (KJ/kg.K)	0,84	1,00
Espes. (m)	0,10	0,05

	Ascendente	Descendente
Rsi	0,1	0,17
Rse	0,04	0,04
α	0,75	

*Verificação da Câmara de Ar:

Cobertura (Inverno)			Cobertura (Verão)		
VERÃO:			VERÃO:		
Rt =	0,4718	(m ² .K)/W	Rt =	0,4718	(m ² .K)/W
RT =	0,6118	(m ² .K)/W	RT =	0,6818	(m ² .K)/W
U =	1,6346	W/(m ² .K)	U =	1,4667	W/(m ² .K)
CT =	179,4	kJ/(m ² .K)	CT =	179,4	kJ/(m ² .K)
B0 =	36,6		B0 =	36,6	
B1 =	13,5204		B1 =	17,5326	
B2 =	-99,58963517		B2 =	-83,97039259	
ϕ =	3,1089	horas	ϕ =	2,7301	horas
FS =	4,9037	%	FS =	4,4002	%