

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

**GUSTAVO ROSAS NASCIMENTO**

**REFRIGERAÇÃO EVAPORATIVA DE TELHADOS  
POR MEIO DE GOTEJAMENTO DE ÁGUA.  
EXPERIMENTO EM BANCADA DE TESTES.**

**SÃO CARLOS – SP**

**2005**

**GUSTAVO ROSAS NASCIMENTO**

**REFRIGERAÇÃO EVAPORATIVA DE TELHADOS  
POR MEIO DE GOTEJAMENTO DE ÁGUA.  
EXPERIMENTO EM BANCADA DE TESTES.**

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

Área de concentração:

Sistemas Construtivos de Edificações

Orientação: Prof. Dr. Mauricio Roriz

**SÃO CARLOS – SP**

**2005**

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

N244re

Nascimento, Gustavo Rosas.

Refrigeração evaporativa de telhados por meio de gotejamento de água. Experimento em bancada de testes / Gustavo Rosas Nascimento. -- São Carlos : UFSCar, 2006. 83 p.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal de São Carlos, 2005.

1. Arquitetura e conservação de energia. 2. Conforto térmico. 3. Arquitetura e clima. 4. Eficiência energética. 5. Refrigeração evaporativa. I. Título.

CDD: 721.04672 (20<sup>a</sup>)



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS**  
**Programa de Pós-Graduação em Construção Civil**

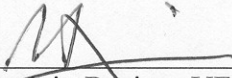
Via Washington Luís, Km 235 - Caixa Postal 676 - Fone (16) 3351-8262 - Fax (16) 3351-8259 - CEP 13565-905 - São Carlos - SP - Brasil


---

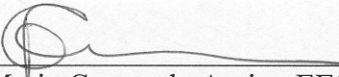
“Refrigeração Evaporativa de Telhados por Meio de Gotejamento de Água. Experimento em Bancada de Testes”.

Gustavo Rosas Nascimento

Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 9 de Dezembro de 2005  
pela Banca Examinadora constituída pelos seguintes professores:

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Mauricio Roriz - UFSCar  
Orientador

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Lucila Chebel Labaki – UNICAMP  
Examinadora Externa

  
\_\_\_\_\_  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. Rosana Maria Caram de Assis - EESC/USP  
Examinadora Externa

Dedico este trabalho ao amor incondicional dos meus pais, Fernando Sergio e Tania, e dos meus irmãos Fabio e Rafael.

## **Agradecimentos**

---

A Deus, por me abençoar com saúde e esperança diariamente.

Aos meus pais, pela dedicação e amor, a eles não saberia agradecer.

Ao Professor Roriz, pela capacidade e disponibilidade em ajudar, pelos ensinamentos e pela conduta inquestionável de cientista que muito me engrandeceram.

A Patricia, cujo amor, compreensão e exemplo de dedicação à pesquisa tanto contribuíram a esse trabalho.

Aos meus irmãos e minha família, pelo orgulho que me sustenta e me impulsiona a cada conquista.

A todos do Programa de Pós-Graduação em Construção Civil da UFSCar, pela confiança e pelo apoio.

Aos amigos do curso, pela cumplicidade e companheirismo, em especial, Adriana Gomes, Andriago Silva, Ana Lucia Mello e Marcus Campos.

Ao Departamento de Arquitetura da EESC-USP, pelo fornecimento dos dados climáticos de sua estação meteorológica.

À CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior do Ministério da Educação, pela bolsa concedida para o desenvolvimento desta pesquisa no período de Outubro de 2004 a Março de 2005.

## Resumo

---

O resfriamento evaporativo de ambientes é conhecido pelos habitantes de regiões de clima seco desde a antiguidade. A evaporação de água sobre coberturas retira calor das mesmas, refrigerando indiretamente o interior da edificação. Este trabalho apresenta resultados de um estudo em que foram medidos os efeitos que a evaporação provoca sobre as temperaturas superficiais internas de telhas de barro e de fibrocimento, sujeitas às variações climáticas como o vento e radiação solar. Para tanto, montou-se uma bancada de testes onde foram monitoradas telhas idênticas, uma com gotejamento de água e outra mantida seca, em situações de inverno em laboratório e em situações de verão em campo. Por meio de análise de regressão, identificou-se fortes correlações entre as quedas observadas nas temperaturas superficiais internas das telhas e as condições climáticas. A evaporação provocou redução de até 18,7 °C na temperatura superficial interna da telha de barro e de até 17°C na de telha de fibrocimento. Os resultados indicaram que o gotejamento de água sobre superfícies externas de telhas de barro e de fibrocimento reduz a temperatura superficial interna das mesmas por meio da refrigeração evaporativa, sendo um potencial método de resfriamento passivo de telhados de barro e de fibrocimento na região de São Carlos-SP.

Palavras chave: Refrigeração Evaporativa; Arquitetura Bioclimática; Eficiência Energética, Conforto Térmico.

## **Abstract**

---

The cooling effect of evaporation is used in dry climates buildings since ancient times. Water evaporation can remove heat of roofs, cooling the interior of buildings indirectly. This study presents the measurement results of a test bed which received two identical tiles, one of them receiving water application and the other kept dry. Its objective was to investigate the effects that the evaporation provokes on internal surface temperature of ceramic tiles and fibrocement tiles. Using regression analyses, strong correlations were found among the falls observed in tiles internal surface temperatures and the climatic conditions. The evaporation provoked reduction of until 18,7 °C in the ceramic roof and until 17°C reduction in the fibrocement one.

**Keywords:** Evaporative Cooling; Bioclimatic Architecture; Energy Efficiency, Thermal Comfort, Water Spray Cooling.



## Sumário

---

<b>Agradecimentos</b> .....	iv
<b>Resumo</b> .....	v
<b>Abstract</b> .....	vi
<b>Sumário</b> .....	vii
<b>1 Introdução</b> .....	9
1.1 Objetivos da Pesquisa.....	13
1.2 Justificativas.....	13
<b>2 Revisão Bibliográfica</b> .....	15
2.1 A Refrigeração Evaporativa.....	15
2.1.1 O Homem e o Uso da Refrigeração Evaporativa.....	17
2.1.2 A Arquitetura Vernacular e o Uso da Refrigeração Evaporativa.....	18
2.1.3 Sistemas Passivos de Refrigeração Evaporativa.....	19
2.1.4 Refrigeração Evaporativa Direta.....	23
2.1.5 Refrigeração Evaporativa Indireta.....	29
2.1.6 Sistemas Mistos de Refrigeração Evaporativa.....	32
2.1.7 A Aplicabilidade dos Sistemas de Refrigeração Evaporativa.....	33
2.1.8 Benefícios Econômicos de Refrigeração Evaporativa.....	34
2.2 O Processo Físico da Refrigeração Evaporativa.....	35
2.2.1 Cálculo do Potencial de Refrigeração Evaporativa.....	36
2.2.2 A Refrigeração Evaporativa em Edificações.....	36
<b>3 Descrição dos Experimentos</b> .....	38
3.1 Identificação dos Locais de Monitoramento.....	38
3.2 Experimento Piloto.....	40
3.3 Experimento em Laboratório.....	41
3.4 Experimento em Campo.....	44
3.5 Instrumentos Utilizados.....	46

<b>4</b>	<b>Apresentação e Discussão dos Resultados</b> .....	49
4.1	Experimento Piloto.....	49
4.1.1	Comparação entre as Lajes LC e EA.....	52
4.2	Experimento em Laboratório.....	54
4.2.1	Experimento em Laboratório com Telhas de Barro.....	55
4.2.2	Experimento em Laboratório com Telhas de Fibrocimento....	57
4.2.3	Comparativo entre as Telhas de Barro e de Fibrocimento....	60
4.3	Experimento em Campo.....	60
4.3.1	Experimento em Laboratório com Telhas de Barro.....	61
4.3.2	Experimento em Laboratório com Telhas de Fibrocimento....	66
4.3.3	Comparativo entre as Telhas de Barro e de Fibrocimento....	72
<b>5</b>	<b>Conclusões</b> .....	75
5.1	Sobre o Experimento Piloto.....	75
5.2	Sobre o Experimento em Laboratório.....	75
5.3	Sobre o Experimento em Campo.....	76
5.4	Sugestões para Estudos Futuros.....	77
<b>6</b>	<b>Referências</b> .....	78

# 1 Introdução

---

A crise de energia que o Brasil e outros países enfrentam, tem sido agravada pelo fraco desempenho térmico de ampla maioria das edificações. Nesse contexto, uma importante função dos arquitetos é a busca constante da melhoria da qualidade do ambiente construído, procurando conciliar o conforto ambiental com a eficiência energética, tanto nos edifícios quanto nos espaços urbanos.

Segundo Lamberts (1983), uma das principais funções de uma habitação é exercer um efeito de filtro às variações climáticas, de modo que o ambiente interno mantenha-se dentro das margens de conforto térmico dos usuários.

Segundo Carneiro (1988) apud Cavalcanti e Prado (2001), com a crise do petróleo, na década de 70, os países foram obrigados a desenvolver esforços no sentido da conservação de energia elétrica, até então variável livre na produção em geral. Sendo a participação do setor de edificações no consumo de energia de significativa importância, Cavalcanti e Prado (2001) definem a variável energia elétrica como um importante critério de projeto arquitetônico e um parâmetro de avaliação do desempenho da edificação.

O Brasil, além de modernizar seu sistema de geração e distribuição de energia, deve rever a maneira de consumi-la.

Os sistemas convencionais de refrigeração do ar não são eficientes quanto ao consumo de energia e apresentam alto custo, se comparado com sistemas passivos de refrigeração de ambientes.

Segundo Mascaró (s.d.) apud Cavalcanti e Prado (2001), a quantidade de calor que chega numa edificação de pavimento único, 70% vem pela cobertura, e 30% pelas fachadas. Sendo essa absorção tão significativa, deve-se impedir a transferência desse calor ao ambiente interno, para o aumento do conforto em climas quentes.

Os sistemas passivos vêm sendo estudados com frequência no mundo todo. Suas aplicações de maneira empírica são conhecidas desde a antiguidade. Os sistemas de refrigeração passiva mais comuns no país são: barreiras de radiação solar, inércia térmica de refrigeração, ventilação seletiva e refrigeração evaporativa. A Tabela 1.1 detalha o procedimento de alguns dos sistemas viáveis à situação brasileira.

Tabela 1.1: Detalhamento das estratégias de condicionamento térmico passivo.  
Adaptado de: NBR 15220-3. 04/2005.

<b>Estratégia</b>	<b>Detalhamento</b>
<b>Refrigeração Evaporativa</b>	Em regiões quentes e secas, a sensação térmica pode ser amenizada por meio da evaporação da água. O resfriamento evaporativo pode ser obtido através do uso de vegetação, fontes de água ou outros recursos que permitam a evaporação da água
<b>Massa Térmica</b>	Temperaturas internas mais agradáveis podem ser obtidas através do uso de paredes (externas e internas) e coberturas com maior massa térmica, de forma que o calor armazenado em seu interior durante o dia seja devolvido ao exterior durante a noite quando as temperaturas externas diminuem.
<b>Ventilação Seletiva</b>	A ventilação seletiva é obtida com a possibilidade de se controlar a circulação de ar pelos ambientes da edificação por meio de aberturas como janelas e portas. Deve-se atentar para os ventos predominantes da região e para o entorno, pois este pode alterar a direção dos ventos.
<b>Aquecimento Solar / Barreira à radiação Solar</b>	A forma, a orientação e a implantação da edificação, além da correta orientação de superfícies envidraçadas, podem contribuir para otimizar o seu aquecimento pela incidência solar direta no frio ou proteger a edificação da incidência solar indesejável em regiões quentes.
<b>Vedações Internas Pesadas</b>	A adoção de paredes internas pesadas pode contribuir para manter o interior da edificação aquecido.

Sendo os sistemas passivos de refrigeração conhecidos como técnicas que proporcionam a diminuição da temperatura de um ambiente, segundo suas condições climáticas, otimizando ou dispensando o uso de energia convencional, González (1997) define sistemas passivos de refrigeração evaporativa como: “aqueles capazes de promover a evaporação da água e distribuir ao ambiente habitável – direta ou indiretamente – o efeito refrescante de tal evaporação”.

Sob condição climática favorável, a evaporação da água pode retirar significativas quantidades de calor da cobertura de um edifício, e resfriar indiretamente o ambiente interno. Embora de maneira empírica, os benefícios da evaporação da água para o conforto térmico ambiental já eram conhecidos por muitos povos da antigüidade, em particular os habitantes de regiões mais quentes e áridas. Os pátios internos da arquitetura islâmica, por exemplo, abrigam espelhos d’água, jardins e fontes, elementos que promovem a evaporação da água, umidificando e resfriando o

ambiente. Exemplos de sistemas de refrigeração evaporativa são comuns na Espanha, Afeganistão, Irã e outros países cuja umidade do ar é baixa na maior parte do ano.

As regiões Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste do Brasil contêm áreas de clima seco, com disponibilidade de água e regiões de clima úmido e semi-úmido, que permitem a diminuição da temperatura de ambientes por meio da evaporação da água. O zoneamento bioclimático brasileiro apresentado pela ABNT sugere o uso de sistemas passivos de refrigeração evaporativa em três zonas específicas: 4, 6 e 7.

### Zoneamento Bioclimático Brasileiro

A ABNT, por meio do projeto 02:135.07-003:1998, apresenta uma metodologia para avaliação do desempenho térmico de habitações unifamiliares e o Zoneamento Bioclimático Brasileiro.

Dividiu-se o território brasileiro em oito zonas relativamente homogêneas quanto ao clima (Figura 1.1) e, para cada uma destas, foi apresentada uma série de recomendações tecno-construtivas e detalhamento de estratégias de condicionamento térmico passivo, que visam otimizar o desempenho térmico das edificações, tanto em fase de projeto quanto já construídas.

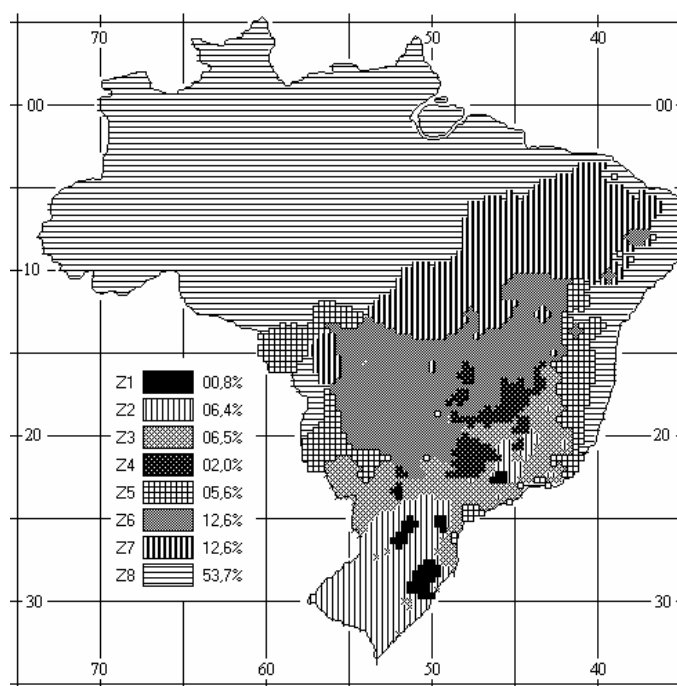


Figura 1.1: Zoneamento Bioclimático Brasileiro.  
fonte: [www.labee.ufasc.br/conforto/textos/t3-termica/texto3-0299.html](http://www.labee.ufasc.br/conforto/textos/t3-termica/texto3-0299.html).

Dentre as estratégias de condicionamento térmico passivo das 8 zonas bioclimáticas, a ABNT sugere o uso da refrigeração evaporativa em três delas: zona 4, zona 6 e zona 7 (Figura 1.2, Figura 1.3 e Figura 1.4). O somatório da área das três zonas onde se afirma a viabilidade da refrigeração de ambientes por meio da evaporação, resulta em 27,2% do território nacional.



Figura 1.2: zona 4. Fonte: ABNT



Figura 1.3: zona 6. Fonte: ABNT



Figura 1.4: zona 7. Fonte: ABNT

A área em questão abrange boa parte das regiões Centro-Oeste, Sudeste e Nordeste do país, excluindo a parte litorânea, onde, em sua maioria, a refrigeração evaporativa não é recomendada.

As cidades de Araraquara e São Carlos – SP, onde foram efetuadas as medições contidas neste trabalho se inserem na zona 4. As cidades em questão se enquadram em clima semi-úmido ou tropical de altitude, onde no inverno predomina o clima frio e seco e no verão o clima quente e úmido (Tabela 1.2). Apesar de a região apresentar clima seco no inverno, há disponibilidade de água durante todo o ano.

Tabela 1.2: Estratégias de condicionamento térmico passivo para as zonas 4, 6 e 7.  
Adaptado de: ABNT, projeto 02:135.07-003:1998.

<b>Estação</b>	<b>Zona 4</b>	<b>Zona 6</b>	<b>Zona 7</b>
<b>Verão</b>	Refrigeração Evaporativa.	Refrigeração Evaporativa.	Refrigeração Evaporativa.
	Ventilação seletiva (períodos quentes onde a temperatura interna for superior a externa).	Ventilação seletiva (períodos quentes onde a temperatura interna for superior a externa).	
		Massa Térmica para resfriamento.	Massa Térmica para resfriamento.
<b>Inverno</b>	Aquecimento solar da edificação.		
	Vedações internas pesadas (inércia térmica).	Vedações internas pesadas (inércia térmica).	

## **1.1 Objetivos da Pesquisa**

O objetivo do trabalho foi avaliar o potencial de redução da temperatura superficial interna de telhas de barro e de fibrocimento, provocada pelo gotejamento de água sobre suas faces externas.

Estudou-se o desempenho do sistema de refrigeração evaporativa por meio de gotejamento de água sobre coberturas e suas limitações quanto à temperatura e à umidade do ar, características do clima tropical de altitude de Araraquara e São Carlos - SP.

### **Objetivos Específicos**

Avaliar em laboratório, a redução da temperatura superficial interna de telhas de barro e de fibrocimento, submetidas à fonte artificial de calor, isolando a influência do vento e da nebulosidade.

Avaliar em campo, o desempenho refrigerativo do gotejamento de água sobre telhas de barro e de fibrocimento, nas condições de verão de São Carlos, submetidas ao calor do Sol e sujeitas às interferências do vento e da nebulosidade.

Correlacionar a redução da temperatura superficial interna das telhas com os dados climáticos observados, em especial: temperatura, umidade, radiação solar e vento.

## **1.2 Justificativas**

Encontram-se no país diversas regiões favoráveis ao uso da refrigeração evaporativa para obtenção de conforto térmico.

O baixo consumo energético e de água, utilizados para retirar calor do edifício através da evaporação, justificam a busca da melhor compreensão desses sistemas.

A evaporação da água; se utilizada racionalmente, sob condições climáticas adequadas; promove queda na temperatura do ar. Os sistemas de refrigeração evaporativa se apresentam como solução para refrigerar edifícios em regiões quentes e secas. Em climas úmidos e semi-úmidos, sistemas indiretos de refrigeração evaporativa também apresentam bons resultados, como os apresentados no próximo capítulo.

Pesquisas realizadas em regiões de clima quente e seco como Negev, Israel; Nevada, Estados Unidos; e quente e úmido como Maracaibo, Venezuela; apresentaram resultados satisfatórios que encorajam a realização de testes de acordo com as condições da região central do estado de São Paulo.

O trabalho não pretende esgotar o assunto gotejamento de água sobre coberturas, mas apenas contribuir para o seu entendimento.

Consta neste trabalho, além deste primeiro capítulo introdutório, mais quatro capítulos. O segundo capítulo define o que é refrigeração evaporativa, apresenta sua utilização em edificações ao longo da história e estudos quanto à sua viabilidade no mundo, atualmente. O terceiro descreve a metodologia aplicada nos experimentos, bem como os materiais e instrumentos utilizados. O quarto capítulo apresenta os resultados obtidos e a análise dos mesmos. O quinto capítulo trata das conclusões obtidas por meio da análise dos resultados e sugere futuras pesquisas.



## 2 Revisão Bibliográfica

---

Consta neste capítulo, a definição de Refrigeração Evaporativa e como esta tem sido utilizada para refrigerar ambientes em alguns lugares do mundo. Estudos feitos por diversos autores de diferentes países explicitam os benefícios e as limitações de sistemas de refrigeração evaporativa, aplicados sob condições climáticas distintas. Comenta-se aqui, a relação do homem com a evaporação da água, a refrigeração evaporativa em edifícios utilizada ao longo da história, e, uma breve explanação teórica sobre o processo físico da evaporação, a ser aprofundada nos próximos itens dessa dissertação.

### **2.1 A Refrigeração Evaporativa**

O processo de Refrigeração Evaporativa consiste em retirar calor do ambiente através da evaporação da água. Para evaporar, a água necessita ganhar calor. Esse calor é retirado do ambiente, sob forma de calor latente.

Segundo Rivero (1985, pg 52), a energia térmica retirada do ambiente serve para manter a água em estado de vapor. Denomina-se Calor Latente à energia térmica associada com uma mudança de estado do corpo, quando não ocorrem variações de sua temperatura. Já calor sensível é a transferência de energia que pode-se perceber através de variações de temperatura. O calor latente de vaporização da água a temperatura ambiente é de aproximadamente 2.400 kJ/kg.

A quantidade de calor sensível de um ambiente é perceptível através de variações de temperatura. A energia que passa a sustentar a água sob o estado de vapor é transformada em calor latente, por consequência, promove a queda da temperatura local.

### Potencial de Evaporação da Água (Pe):

Sob condições adiabáticas<sup>1</sup>, a evaporação da água diminui a temperatura do ar e eleva sua taxa de umidade<sup>2</sup>, mantendo constante o total de energia (calor sensível + calor latente). Cada litro de água evaporado sob essas condições (Equação 1), absorve em torno de 666 Wh (Equação 2.1) (González, 1997), sendo possível aproveitar essa energia para refrigerar os ambientes. Essa quantidade de energia corresponde ao calor produzido por aproximadamente 9 lâmpadas de 100W durante uma hora, considerando-se lâmpadas incandescentes com eficiência de 30%, ou seja, lâmpadas onde 70% de sua energia se transformam em calor e 30% em luz.

$$Pe = \frac{1(\text{kg}) \times 2.400(\text{kJ} / \text{kg})}{3.600(\text{s})} = 0.666\text{kWh} \quad \text{Equação 2.1}$$

Fonte: González (1997).

O fator mais importante na eficiência de qualquer sistema de Refrigeração Evaporativa é a diferença entre a temperatura de bulbo seco (TBS) e a temperatura de bulbo úmido (TBU), denominada Diferença Psicrométrica ( $\Delta PSI$ ) (Equação 2.2).

$$\Delta PSI = TBS - TBU \quad \text{Equação 2.2}$$

Denomina-se temperatura de bulbo úmido, ou simplesmente TBU, à temperatura medida por um termômetro cujo bulbo é envolvido em gaze umedecida. Ao evaporar, a água contida na gaze retira calor do bulbo. Quanto maior o volume de água evaporado, maior a quantidade de calor retirado do bulbo.

### Refrigeração Evaporativa Direta e Indireta

Givoni (1994) define duas maneiras de refrigerar o ambiente através da evaporação da água. A primeira consiste em inserir gotículas de água no ambiente, seja por meio de equipamentos mecanizados – tubos com micro furos que lançam essas partículas no ar – seja através de processos naturais, quedas d'água, entre outros. O autor define o processo como Refrigeração Evaporativa Direta. O processo eleva a umidade do ar, fato que em algumas situações, pode ser indesejável.

---

<sup>1</sup> Condições Adiabáticas – Situação hipotética onde não haja trocas de calor e umidade com elementos externos ao sistema.

<sup>2</sup> Taxa de Umidade - razão entre a massa de vapor d'água e a massa de ar seco contidos em uma amostra.

A segunda forma é promover a evaporação da água fora do ambiente. É comum regar parte do edifício, o telhado por exemplo, com água corrente. Esta água, ao evaporar, diminui a temperatura da telha e, indiretamente, a temperatura ambiente. Esse sistema reduz os ganhos de calor do ambiente, sendo uma maneira indireta de refrigerá-lo. Portanto, Givoni as define como Sistemas de Refrigeração Evaporativa Indireta.

### 2.1.1 O Homem e o Uso da Refrigeração Evaporativa

Segundo Roriz (2003), a vida animal depende de reações através das quais a energia química dos alimentos é transformada em calor. A velocidade dessas reações é afetada pela temperatura. Durante a evolução, os animais superiores, aves e mamíferos, desenvolveram um aparelho de regulação de temperatura que os capacita a manter constante sua temperatura corporal independente da temperatura do ambiente, fora das faixas de temperatura consideradas críticas. Esses seres são chamados de homeotérmicos.

As alterações comportamentais termorreguladoras são controladas pelo sistema nervoso central, em particular pelo hipotálamo, considerado como centro sensorial para a termorregulação. O hipotálamo integra funções como controle de temperatura, fome, sede e impulso sexual. Os centros do hipotálamo estão sujeitos à regulação por muitas áreas do cérebro.

O calor é produzido no corpo pelas atividades metabólicas, mas também pode ser absorvido a partir do exterior por meio de radiação, condução e convecção. Já a perda de calor acontece por meio de radiação, condução, evaporação da água a partir da pele e vias aéreas e, pela excreção de fezes e urina.

A evaporação da água é um meio eficaz de resfriamento do corpo. Enquanto apenas 0,86 W são necessários para elevar a temperatura de 1 grama de água em 1°C, quase 516 W são necessárias para a evaporação da mesma quantidade de água no corpo sob temperatura e umidade normais. Cerca de 25% do calor produzido em mamíferos em repouso, é perdido pela evaporação da água a partir da pele e das vias aéreas. Essa perda de água é muitas vezes imperceptível, de forma cutânea e respiratória.

Em seres humanos, a perda de calor obtida por sudorese pode ser de até 860 W / hora.

A polipnéia, respiração ofegante ou rápida, em muitas espécies é acompanhada por aumento considerável na refrigeração evaporativa respiratória se a umidade do ar inspirado não for muito alta.

A sensação de resfriamento ao molhar-se o corpo, deve-se à evaporação da água em contato com a pele, além das trocas de calor por convecção e condução.

Utiliza-se a refrigeração evaporativa não só em reações metabólicas do corpo ou em ambientes construídos, mas em maquinários e implementos de diversos setores industriais como exemplo o automobilístico, aeronáutico entre outros, sendo a refrigeração evaporativa um freqüente objeto de estudo da engenharia mecânica.

Alguns setores agropecuários como a cultura de frutas e hortaliças, bem como a criação de animais como aves e suínos, que dependem de condições de temperatura e umidade adequadas para ter o seu desenvolvimento otimizado, aplicam os sistemas de refrigeração evaporativa para o controle climático de ambientes.

### 2.1.2 A Arquitetura Vernacular e o Uso da Refrigeração Evaporativa

Na arquitetura produzida em regiões áridas, encontra-se o uso da refrigeração evaporativa como auxílio a umidificação do ar e ao Conforto Térmico.

Como exemplo, na Arquitetura Islâmica (Figura 2.1), os pátios internos abrigam superfícies consideráveis de água, jardins e fontes, prova de que o homem já percebera, de maneira empírica, os benefícios da evaporação da água no conforto térmico em ambientes construídos. Exemplos de sistemas passivos de refrigeração evaporativa são encontrados na Espanha, Afeganistão, Irã e outros países cuja umidade do ar é baixa na maior parte do ano.



Figura 2.1 – Mansão no Egito. ([www.guiadeviagens.com.br/egito.prompt1](http://www.guiadeviagens.com.br/egito.prompt1))

Safar zadeth e Bahadori (2003) desenvolveram em Teerã (Irã) um software com o propósito de avaliar numericamente o efeito refrigerativo de um pátio de edifício residencial. O pátio em questão é composto por duas árvores que protegem a face Sul do edifício contra a radiação solar, uma fonte de pequeno porte, superfície com grama e jardim. Concluiu-se que o efeito refrigerativo produzido pela presença do pátio não é suficiente para que se mantenha o edifício em condições de conforto térmico, em dias quentes de verão em Teerã. Porém, a presença do pátio, reduz a demanda de energia consumida para refrigeração do ambiente interno.

Potes porosos (Figura 2.2), localizados junto aos edifícios, mostram que, na Antiguidade, o homem já descobrira de maneira empírica, que o ar quente e seco era resfriado ao passar por esses compartimentos de barro poroso cheios de água.



Figura 2.2 – Potes de Barro em Corinto - Grécia Antiga.  
Fonte: Roriz, 2003.

### 2.1.3 Sistemas Passivos de Refrigeração Evaporativa

“Sistemas Passivos de Refrigeração Evaporativa são aqueles capazes de promover a evaporação da água e distribuir ao ambiente habitável – direta ou indiretamente – o efeito refrescante de tal evaporação sem o consumo de energia convencional” (González, 1997).

Segundo González (1997), é fundamental nos sistemas passivos de refrigeração por evaporação, o uso de técnicas que disponham da maior superfície possível de água em contato com o ar e com uma razoável velocidade. É comum o uso do teto e paredes do edifício para disponibilizar essa superfície de água.

## **A Vegetação como Refrigerador Evaporativo**

Como seres vivos, produtores de evapotranspiração, as árvores e a vegetação, umidificam e refrigeram o ambiente.

Allen (1998) define evapotranspiração como a combinação de dois processos, a evaporação e a transpiração, onde há perda de água tanto do solo quanto da vegetação. No processo, a evaporação e a transpiração ocorrem simultaneamente, sendo difícil dissociá-las. Em vegetações pouco desenvolvidas ou com pouca densidade, predomina o processo de evaporação pelo solo. Em vegetações densas e desenvolvidas, a incidência maior é de transpiração pelo vegetal.

Em Otsuka, Japão, Onmura, Matsumoto e Hokoi (2001) investigaram os efeitos da evaporação em cobertura verde com grama, em situação de verão. Comparou-se a cobertura verde com cobertura plana de concreto. Os resultados obtidos nas medições foram de redução de 30°C na temperatura superficial externa na cobertura gramada, em relação à cobertura de concreto. Registrou-se temperatura média da cobertura verde em torno de 30°C enquanto a temperatura média da cobertura de concreto foi registrada em torno de 60°C. Simulações em túnel de vento confirmaram as reduções de temperatura aferidas em campo. O estudo resultou em modelo matemático que prevê o comportamento refrigerativo de coberturas verdes com grama.

Morais (2004) avaliou o comportamento térmico de um protótipo de cobertura verde em São Carlos, em situação de inverno e verão. Monitorou-se duas lajes de cobertura, uma com vegetação e outra sem, considerando a temperatura do ar, as temperaturas superficiais, irradiância solar global e velocidade do vento. Constatou-se que, no inverno, a cobertura verde apresentou amplitude térmica 70 % menor que a da cobertura sem vegetação, ou seja, a cobertura verde contribuiu para que a temperatura do ambiente se mantivesse mais estável. No verão, aferiu-se temperatura do ambiente com cobertura verde até 5°C mais baixas que as aferidas no ambiente sem vegetação. A autora concluiu que *“...a cobertura ajardinada dispõe de importante potencial de aplicação no clima considerado, sendo solução de custo relativamente baixo e podendo contribuir efetivamente para melhorar o conforto ambiental e a eficiência energética do ambiente construído.”*

## As Fontes como Refrigeradores Evaporativos

Além do aspecto decorativo, as fontes funcionam como aspersores diretos em espaços abertos, ou seja, inserem gotículas de água no ar que, ao evaporar, retiram calor do ambiente, refrigerando-o de forma passiva. Geralmente, as fontes englobam superfícies consideráveis de água (espelhos d'água) que também promovem refrigeração evaporativa.

## Refrigeração Evaporativa utilizando Superfícies de Água

O Espelho d'água é considerado um eficiente refrigerador passivo por evaporação (Figura 2.3).



Figura 2.3: Museu da Escultura de São Paulo. Fonte: [www.mube.art.br](http://www.mube.art.br)

Nahar, Sharma e Purohit (1997) efetuaram na Índia, durante o verão de 1996, um comparativo entre quatro diferentes sistemas de refrigeração passiva sobre coberturas (Figura 2.4 e Figura 2.5). Foram construídos cinco blocos idênticos em estrutura metálica, vedada com aço galvanizado, medindo 1.28 m de comprimento, 0.64 m de largura e 1.07 m de altura.

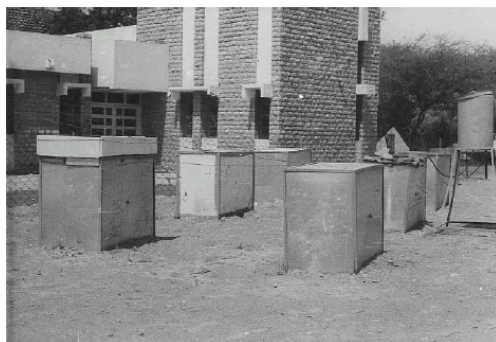


Figura 2.4: Módulos de Nahar, Sharma e Purohit (1997) em campo.

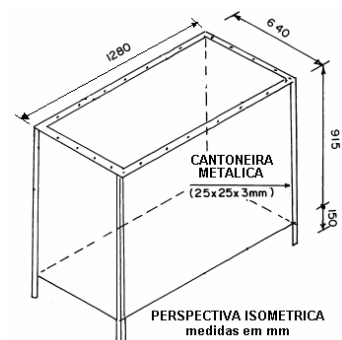


Figura 2.5: Perspectiva dos Módulos de Nahar, Sharma e Purohit (1997).

No primeiro bloco (a) nada se fez, foi utilizado como módulo de referência. No segundo bloco (b), pintou-se a cobertura de branco. O terceiro bloco (c) teve sua cobertura acrescida de 40 mm de material termo-isolante. No quarto bloco (d),

acrescentou-se película de 10 cm de água mais 40 mm de material termo-isolante sobre sua superfície. O quinto bloco (e) teve sua cobertura envolvida em tecido constantemente umedecido, promovendo refrigeração evaporativa.

As reduções máximas de temperatura (Figura 2.6) aferidas em relação ao módulo de referência (a) na temperatura do ambiente e na temperatura superficial interna foram de, respectivamente: (b) 7°C na temperatura do ambiente interno e 22°C na temperatura superficial interna; (c) 3°C e 8°C; (d) 8°C e 23°C; (e) 10°C e 32°C. Apesar do bloco (e), que promoveu refrigeração evaporativa, ter apresentado maior redução de temperatura, tanto do ambiente interno quanto superficial, os autores concluem que a melhor opção para o clima local seria o bloco (d). A cobertura móvel de material termo-isolante (d) permite que o sistema possua bom desempenho durante o dia e à noite. Durante o dia, a placa termo-isolante seria removida, aproveitando a evaporação da água para refrigeração da cobertura. Durante a noite, a placa seria recolocada, diminuindo a perda de calor da superfície de água para o ambiente externo por radiação.

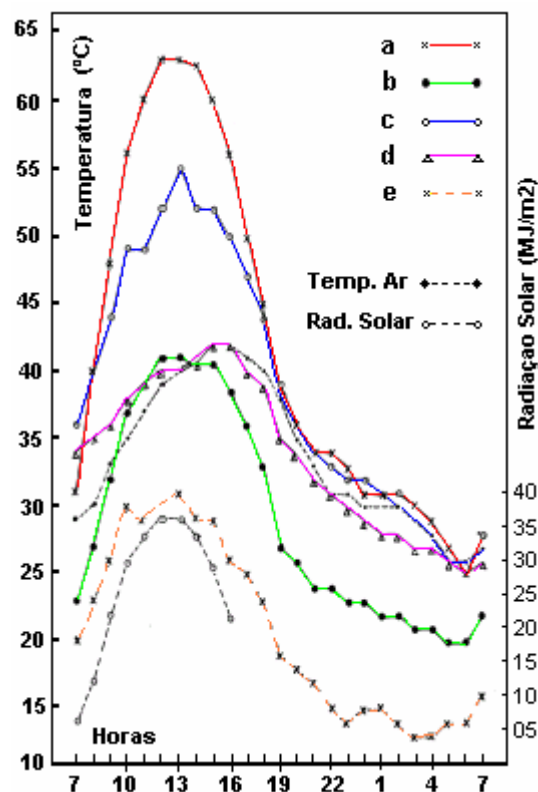


Figura 2.6: Experimento feito por Nahar, Sharma e Purohit (1997)  
Adaptado de: Nahar, Sharma e Purohit (1997)

Adotou-se nos estudos de Nahar, Sharma e Purohit, condições de dia típico de verão, com: temperatura máxima de 41,7°C, temperatura mínima de 28,2°C, umidade



relativa às 07:30h de 51%, umidade relativa às 14:30h de 17%, radiação solar de 7500 Wh/m<sup>2</sup>, velocidade do vento de 4,61 km/h e incidência solar de 11,9 horas por dia.

Nahar, Sharma e Purohit (2003) deram continuidade ao estudo comparativo entre os sistemas passivos de refrigeração pela cobertura. No ano de 2003, foram construídos sete blocos idênticos, medindo 1.28 m de comprimento, 0.61 m de largura e 1.10 m de altura. Foram acrescentadas placas cimentícias de 10 cm de espessura à cobertura dos mesmos, sendo a estrutura em estrutura metálica e a vedação em aço galvanizado. Aplicou-se sobre a cobertura dos blocos os seguintes sistemas passivos de refrigeração: (a) nenhum (módulo de referência); (b) pintura branca; (c) placa de 5 cm de cimento vermiculite; (d) tanque de água de 10 cm de espessura mais placa termo-isolante de 4 mm; (e) refrigeração evaporativa por meio de tecido umedecido; (f) brita de cascalho de vidro; (g) placa de cimento corrugada com colchão de ar; (h) “sania” – material comum em coberturas na Índia.

As reduções de temperatura aferidas em relação ao módulo de referência (a) estão descritas na (Tabela 2.1):

Tabela 2.1: Reduções de Temperatura Superficial. Nahar, Sharma e Purohit (2003).

módulo	a	b	c	d	e	f	g	h
material	Referência	Pintura Branca	Cimento Vermiculite	Água e Placa	Tecido Umedecido	Cascalho de vidro	Placa corrugada	“Sania”
Redução de Temperatura	-	5,4°C	3,5°C	6,7°C	<b>13,2°C</b>	11,0°C	5,8°C	3,4°C

Apesar de, novamente, o bloco (e) (refrigeração evaporativa) apresentar a maior redução de temperatura em relação ao módulo de referência, os autores concluíram que o bloco (f) (cascalho de vidro) é o mais indicado, pois a demanda de água para o pleno desempenho do bloco (e) seria de 50 litros de água por metro quadrado ao dia, valor questionável, como será descrito a seguir, na parte experimental do presente trabalho.

#### 2.1.4 Refrigeração Evaporativa Direta

Como descrito anteriormente, a refrigeração evaporativa direta consiste em inserir gotículas de água no ambiente de forma direta, elevando sua umidade. Ao evaporar, a água retira o calor sensível do local, transformando-o em calor latente.

Sistemas de Refrigeração Evaporativa Direta são aplicáveis em regiões secas com disponibilidade de água. Os edifícios refrigerados dessa maneira registram temperaturas entre 20 e 40% superiores a máxima TBU exterior.

Em clima quente e úmido, onde a umidade relativa é alta, portanto a diferença psicrométrica (Equação 2.2) é pequena, deve-se ter atenção sobre o desempenho dos Sistemas de Refrigeração Evaporativa, pois geralmente não são aplicáveis sob a forma direta.

Krishan Kant e Mullick (2003) efetuaram estudo de refrigeração evaporativa direta em situação de verão em Nova Delhi (India) nos meses de Abril, Maio e Junho. Em um cômodo refrigerado por evaporação direta, comparou-se a situação entre telhado exposto à radiação solar e telhado protegido da radiação solar. Concluiu-se que ainda que o telhado esteja exposto à radiação solar, é possível que se mantenha o cômodo dentro da Zona de Conforto estipulada para Nova Delhi, sendo necessário a combinação da refrigeração evaporativa direta com trocas de ar (ventilação).

### Sistemas Mecânicos

Os Sistemas Mecânicos de refrigeração evaporativa (Figura 2.7), apesar de não serem passivos, consomem relativamente pequena quantidade de energia se comparados com sistemas convencionais de refrigeração (Figura 2.8) como o aparelho condicionador de ar comercializado em larga escala em regiões quentes no mundo. Geralmente, os aparelhos mecânicos funcionam com ventilador axial, dotado de grelha direcionadora de ar para descarga direta no ambiente. Utilizado em áreas localizadas ou em ambientes onde a circulação de ar seja livre. Normalmente é a instalação com menor custo, podendo ser acoplado a sistemas existentes de condicionamento de ar.



Figura 2.7 - Aparelho refrigerador evaporativo disponível no mercado. Modelo CEA, da empresa Catermo. ([www.catermo.com.br](http://www.catermo.com.br)).



Figura 2.8 - Aparelho refrigerador convencional marca Aspen, modelo EJV-6000 btus. ([www.submarino.com.br](http://www.submarino.com.br)).

### Refrigeração e Umidificação do Ar aproveitando o Vento

Em regiões áridas de países em desenvolvimento, sistemas populares de refrigeração evaporativa são comuns, apesar de serem pouco divulgados estudos precisos sobre o desempenho dos mesmos. Aproveitando o vento, é possível

refrigerar pequenas construções com sistemas muito simples, como a instalação de filtros ou tecidos umedecidos sobre a janela de um cômodo. O ar proveniente do exterior passa pelo filtro, promove a evaporação da água, que retira calor do ambiente.

Zahra Ghiabaklou (2003) analisou a sensação térmica de usuários de um edifício em Teerã (Irã). Foi instalada no edifício uma “cortina” de fios de nylon medindo 10 m de altura, 10 m de comprimento e 2,80 m de largura. Associada à “cortina”, uma bomba fornecia água ao topo, mantendo-a com água corrente, proveniente de um reservatório. O ar que passava pela “cortina” era resfriado e umedecido. Nos resultados, constatou-se apenas 5,4% dos votos nos níveis de desconforto por calor. Ao se dobrar a área de superfície de água, pouco se alterou nos resultados. Simulações demonstraram que a alteração no número de trocas de ar contribuiria para melhores níveis de conforto durante a noite, com o equipamento não era utilizado.

Liao e Chiu (2002) investigaram em túnel de vento, a eficiência refrigerativa de mantas de PVC de 50, 100 e 150 mm de espessura.

Segundo Koca et al. (1991) apud Liao e Chiu (2002), o desempenho evaporativo de telas com água depende do ângulo de inclinação, da espessura da tela, velocidade do ar e a queda da pressão estática através da tela, podendo ser expressa em eficiência de umidificação.

Eficiência da Umidificação (Roriz 2000) (Equação 2.3) é a razão entre a queda ocorrida na temperatura do ar ( $\Delta TBS$ ) e a diferença psicrométrica ( $\Delta PSI$ ).

$$EfU = \frac{\Delta TBS}{\Delta PSI} \quad \text{Equação 2.3}$$

Fonte: Roriz, 2000

Onde:

EfU – Eficiência de Umidificação

$\Delta TBS$  – Diferença entre a TBS inicial e a final.

$\Delta PSI$  – Diferença psicrométrica

O objetivo do trabalho de Liao e Chiu (2002) foi obter a influência da velocidade do ar, do fluxo de água e da transferência de calor pela tela, no processo evaporativo das diferentes espessuras de tela de PVC. As eficiências refrigerativas resultantes foram de: 47,22% a 57,23% na tela de 50 mm; 62,93 a 72,25% na tela de 100 mm; e 76,68 a 85,51% na tela de 150 mm, em situações de velocidade do ar de 0,5 a 2,0 m/s. Concluiu-se que a tela de 150 mm no caso possui melhor desempenho para refrigeração do ar.

## Torres Evaporativas

As torres evaporativas promovem trocas de ar no ambiente interno aproveitando a ventilação natural. Capta-se o ar proveniente do exterior, este com temperatura alta e baixa umidade. No interior da torre, encontram-se umidificadores, painéis úmidos ou aspersores de água. Ao passar pela torre, o ar seco e quente é umedecido e refrigerado por meio da evaporação da água.

Torre de Cunningham e Thompson (1986) (Tucson, Arizona, EUA): o sistema (Figura 2.9) consiste em uma torre de refrigeração evaporativa de fluxo descendente, de seção horizontal de 1,80 por 1,80m e altura de 7,60m, acoplada a um edifício de aproximadamente 100 m<sup>2</sup>, com insolação significativa. O topo da torre possui quatro placas de celulose com água bombeada em determinado ritmo. O modelo apresentado contém outra torre acoplada ao edifício, com suas paredes pintadas de cor preta, que funciona como “chaminé solar” e, por diferença de pressão devido ao ar mais quente em seu interior, estimula a exaustão do ar interno, promovendo maior fluxo de trocas de ar no edifício, e, por conseqüência, aumenta a eficiência do sistema.

Os resultados apresentados são muito satisfatórios. Para uma temperatura exterior de 40.6°C e TBU de 21.6°C, a torre (Figura 2.10) insufla ar à temperatura de 23.4°C, com uma velocidade de 0.75 m/s.



Figura 2.9: Torre de Cunningham eThompson.(Givoni, 2004)

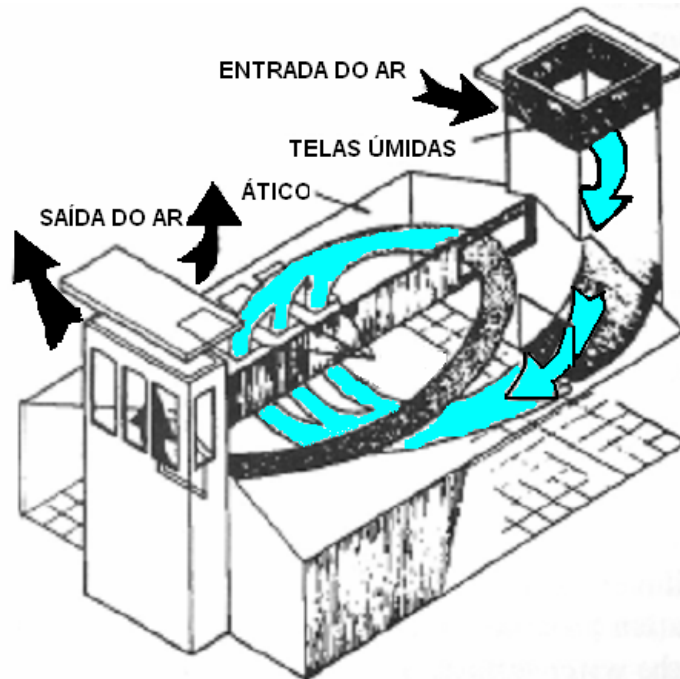


Figura 2.10: Esquema da Torre de Cunningham e Thompson. (Givoni, 1994).

Badran (2003) analisou o projeto tradicional de torres evaporativas utilizadas na Jordânia, sob três condições climáticas. Estimou-se o desempenho de uma torre construída em três áreas de Amman, na Jordânia: área desértica; área montanhosa e área do vale de Ghor (Amman). Concluiu-se que são suficientes menos de 9 m de altura para que se promova condição de conforto, ao invés de 15 m normalmente utilizados na região. Segundo o autor, uma torre de 4 m de altura com seção horizontal de 57 x 57 cm pode produzir o equivalente a 1 ton de refrigeração.

Givoni (1994) apresentou estudo sobre Torre de Refrigeração Convectiva-Inercial / Ducha Evaporativa. A água é bombeada verticalmente no ambiente por micro-furos como uma ducha no topo de uma torre. Esta entra em contato com uma quantidade significativa de ar, umedecendo e refrigerando-o. A água, ao chegar ao fundo da torre, é coletada e bombeada novamente ao topo da torre. A abertura no topo da torre permite que o ar quente seja dissipado por saídas laterais. Um coletor de vento instalado no topo da torre estimula o fluxo inercial do ar pelo efeito do vento.

O experimento apresentado na UCLA (EUA, Figura 2.11) registrou depressão da TBU em 72%, além de reduzir a quantidade de partículas em suspensão no ambiente.

Esse sistema também funciona com água salgada.

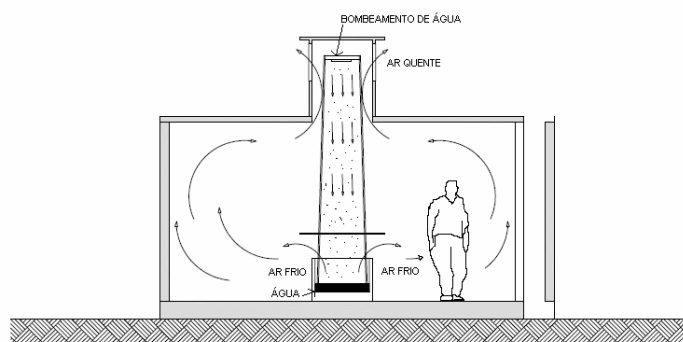


Figura 2.11 - Torre Convectiva-Inercial, Ducha Evaporativa. (Adaptado de Givoni, 1994).

Bowman et al (1997) vêm desenvolvendo trabalho multidisciplinar que avalia modelo computacional de dinâmica de fluídos e comportamento, potencial e viabilidade econômica de torres evaporativas. Apresentou-se estudo sobre a aplicabilidade de torres evaporativas quanto à redução no consumo de energia em edificações. O resultado esperado do trabalho é a formulação de um guia de aplicação de torres evaporativas para arquitetos e engenheiros.

### **Refrigeração de Espaços Abertos por meio da Evaporação**

Assim como as fontes, citadas anteriormente, aspersores de água como dutos com pequenos furos podem inserir gotículas de água no ar, elevando sua umidade e refrigerando-o por evaporação.

Na Expo92, em Sevilha, Espanha, foi apresentado um modelo de sistema de aspersores para ambientes externos. Pulverizadores de alta pressão foram instalados em árvores e fachadas de edifícios que, por evaporação e convecção, refrigeravam ambientes abertos (Figura 2.12).



Figura 2.12 - Expo 92 em Sevilla, Espanha: condicionamento de espaços públicos.

Os pulverizadores, quando instalados em torres como visto anteriormente, apresentam, em espaços externos, refrigeração por convecção forçada (Figura 2.13 e Figura 2.14), ou seja, ventiladores provocam a convecção e por consequência a refrigeração do ambiente.

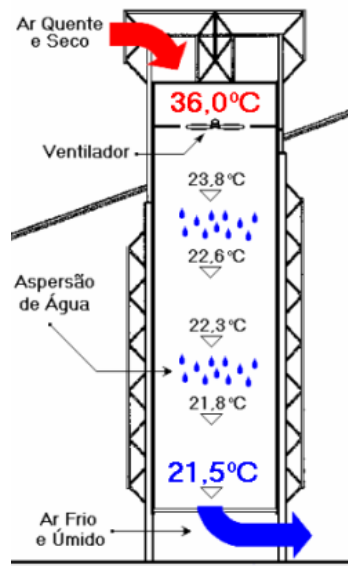


Figura 2.13 – Experiência de Torre Evaporativa em Israel.  
Fonte: Roriz, 2003.

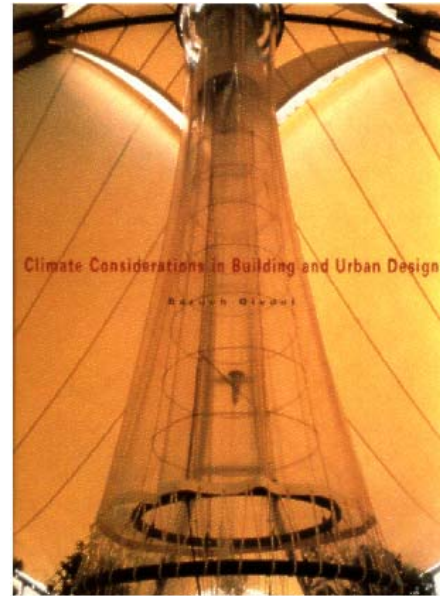


Figura 2.14 - Expo 92 em Sevilla, Espanha - Torre Evaporativa Givoni, 1994.

### 2.1.5 Refrigeração Evaporativa Indireta

A refrigeração evaporativa indireta consiste em aproveitar a evaporação da água para resfriar parte do edifício, reduzindo a carga térmica transferida para o ambiente interno, refrigerando-o de maneira indireta. O foco de estudo deste trabalho compreende sistema indireto de refrigeração evaporativa por gotejamento.

O sistema não interfere na umidade do ar interior, posto que a elevação da umidade do ar em algumas regiões pode ser indesejável. Aconselha-se sua aplicação em lugares com TBU não maiores que 25°C e valores máximos de TBS de 46°C (Givoni, 1994).

## Experiência de Superfícies de Água sobre a Cobertura

González (1997) desenvolveu experimento em escala real em região quente e úmida - Maracaibo, Venezuela – utilizando dois edifícios de mesma característica construtiva, mesma orientação, e idênticas condições climáticas (Figura 2.15).

O presente estudo analisou apenas a série com superfície livre, ventilada de maneira natural (ESULIB.SV), pois é a única que aproveita o efeito evaporativo da água durante todo o dia.

A série é protegida da abóbada celeste por uma placa plástica - radiação solar direta - durante o dia, porém permitida a ventilação 24 horas ao dia (Figura 2.16).

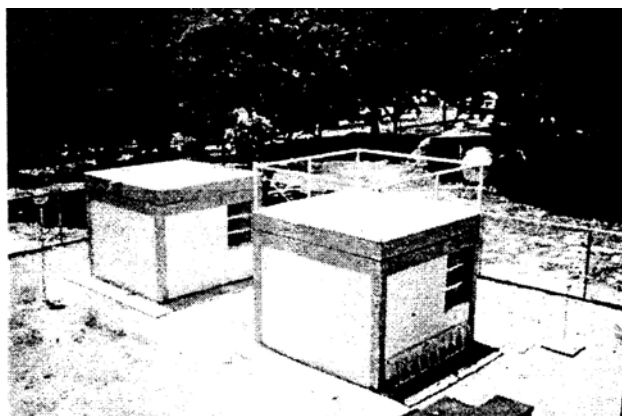


Figura 2.15 - Experimento em Maracaibo, Venezuela.  
Fonte: González, 1997.

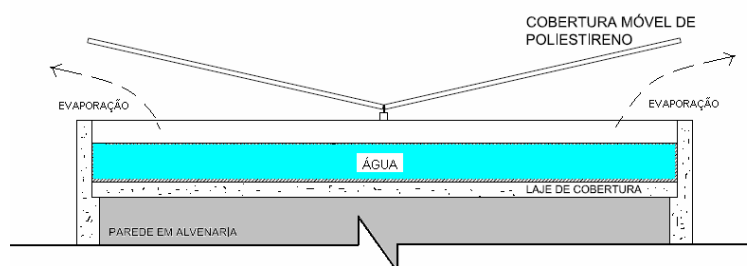


Figura 2.16 – Desenho esquemático do experimento em Maracaibo, Venezuela.  
Fonte: González, 1997.

Constatou-se a temperatura interna média de 27.4°C, 2.6°C inferior ao módulo de referência e 0.5°C inferior a TBS exterior. A Temperatura média exterior se mantém durante a noite entre 0.5°C e 0.8°C superior a TBS interna; o potencial de redução de temperatura seria otimizado ao ventilar o interior do módulo quando a TBS exterior for menor que a temperatura interna.



Tang e Etzion (2004) compararam dois métodos de refrigeração de cobertura utilizando água. O primeiro se tratava de tanque de água coberto protegido por tecido rústico, no caso, sacos feitos de algodão em malha grosseira. O segundo era composto pelo próprio tecido umedecido com água. Independente do tipo de cobertura, o primeiro método apresentou melhor desempenho. Aconselha-se a profundidade do tanque de 20 cm no caso de coberturas de concreto e 5 cm no caso de coberturas metálicas. Os resultados foram adquiridos por simulação e modelo matemático, deve-se ainda levá-lo à experiência em campo. O primeiro método (tanque de água) ainda proporciona maior estabilidade à temperatura superficial externa da cobertura.

Meng e Hu (2005) propuseram um método de instalação de camada porosa úmida de areia e cascalho sobre coberturas planas, com o objetivo de se obter resfriamento por evaporação. Desenvolveu-se modelo numérico que pode prever o comportamento refrigerativo por evaporação do conjunto, de acordo com dados medidos, aferidos no período de verão em região subtropical da China (Guangzhou), com altas temperaturas e alta umidade. Constatou-se teoricamente, redução de 25°C na temperatura superficial externa da cobertura e redução de 5°C na temperatura superficial interna, para a situação em questão. O estudo sobre camadas porosas úmidas se estendeu à possibilidade de se inserir bolhas de ar em placas de concreto para que fossem umedecidas posteriormente. A técnica não teve comportamento refrigerativo por evaporação comprovado.

### **Aspersão de Água sobre a Cobertura**

A refrigeração evaporativa por meio de aspersão de água é um método de se refrigerar a cobertura sem o acúmulo de água sobre sua face externa. Em tese, toda a água utilizada no sistema evapora. A água é aplicada sobre a face externa da cobertura em forma de gotículas, por meio de aspersores.

O sistema dispensa cuidados comuns em espelhos d'água como manutenção contra infiltrações, limpeza constante do tanque de água, tratamento da água contra proliferação de insetos, algas entre outros. A aspersão de água é viável em coberturas inclinadas e telhados, onde nem sempre é possível o uso de superfícies de água.

Chandra, Kaushik e Bansal (1985) analisaram em Nova Delhi (Índia) a transferência de calor em três sistemas de refrigeração evaporativa: aspersão de água sobre cobertura, espelho d'água e espelho d'água com cobertura móvel. Utilizou-se modelo matemático para simulação dos sistemas em um dia típico de verão na cidade.

Incorporou-se na análise, os efeitos de ventilação e transferência de calor por radiação. Segundo os autores, o sistema que provocou maior redução de temperaturas superficiais externas e internas na cobertura foi o de aspersão de água. Porém, afirmam que o espelho d'água com cobertura móvel é mais eficiente para estabilizar as trocas de calor entre o ambiente interno e externo. Essa estabilidade é necessária em climas áridos, onde a amplitude térmica diária é muito alta, portanto a perda de calor por radiação durante a noite é indesejável.

Al-Turki e Zaki (1991) desenvolveram um modelo matemático que simula os efeitos de aspersão de água sobre cobertura plana de concreto. No artigo em questão, introduziu-se temperatura fictícia, típica de verão em Jeddah (Arábia Saudita), radiação solar média e efeitos da evaporação da água sobre cobertura plana de concreto. Os autores afirmam que a aspersão de água sobre cobertura de concreto resultou em redução de 40% do fluxo de calor ( $W/m^2$ ) proveniente do ambiente externo, em comparação com cobertura sem aspersão de água.

Encontra-se no Brasil, empresas que comercializam sistemas de aspersão de água sobre a cobertura, principalmente em grandes centros urbanos como a cidade de São Paulo (Figura 2.17). Não é comum, a aplicação desse sistema em edifícios de até dois pavimentos com menos de 400 metros quadrados de área, ficando sua aplicação restrita a grandes galpões industriais com mais de 500 metros quadrados de área construída.



Figura 2.17: Vista do Sistema Evafrio em operação.  
([www.evafrio.com.br](http://www.evafrio.com.br))

### 2.1.6 Sistemas Mistos de Refrigeração Evaporativa

Os sistemas mistos são aqueles que aproveitam os benefícios da refrigeração evaporativa em conjunto, direta e indiretamente, utilizando equipamentos mecânicos ou não.

Ford, Patel e Zaveri (1998) analisaram sistema passivo de refrigeração evaporativa por meio de aberturas com telas umedecidas. Instalou-se exaustor mecânico, que promove quantidade maior de trocas de ar no edifício, um laboratório químico particular em Ahmedabad (Índia). Resultados de verão apontam temperaturas internas de 10 a 15°C mais baixas que as temperaturas externas. O custo do sistema se apresentou 64% mais baixo que o custo de um sistema convencional de condicionamento do ar. Verificou-se melhoria na qualidade do ar quanto a odores e partículas em suspensão.

### **Experiência em Centro de Estudos em Negev, Israel**

O campus do centro de estudos de Blaunstein (Figura 2.18) localiza-se nas terras altas da região árida de Negev ao sul de Israel (latitude aprox. 32N).

O edifício contém pátios internos com vegetação, promovendo a evapotranspiração. Possui uma torre de fluxo descendente com sistema de aspersão de água que, no verão refrigeram o ar na parte mais baixa do edifício e promovem a exaustão do ar quente pela torre.

A água em excesso é aproveitada em superfícies em desníveis que, refrigeram o ar e irrigam os jardins internos. (Givoni, 1994).



Figura 2.18 : Sede do Centro de Estudos em Negev, Israel

#### **2.1.7 A Aplicabilidade dos Sistemas de Refrigeração Evaporativa**

A eficiência dos Sistemas de Refrigeração Evaporativa depende da Diferença Psicrométrica ( $\Delta$ PSI). Quanto maior essa diferença, maior é o potencial do sistema.

As regiões quentes e secas, o semi-árido, regiões onde há um grande período de estiagem durante o ano, permitem maior eficiência ao processo, pois o ar absorve umidade facilmente, acelerando o processo refrigerativo pela evaporação. Segundo González (1997), alguns sistemas de refrigeração evaporativa possuem bom desempenho em ambientes de clima úmido e semi-úmido.

O zoneamento bioclimático brasileiro apresentado pela ABNT, citado no Capítulo 1 do presente trabalho, adaptou uma carta bioclimática, a partir da sugerida por Givoni (1992). A carta bioclimática insere sobre a carta psicrométrica, retas formadas pelas médias anuais das máximas temperaturas – em uma extremidade – e as médias das mínimas temperaturas - em outra extremidade - de algumas cidades que compõem cada zona bioclimática (Figura 2.19, Figura 2.20 e Figura 2.21). A carta psicrométrica apresenta 11 áreas onde a ABNT define estratégias de condicionamento térmico passivo distintas (Tabela 2.2).

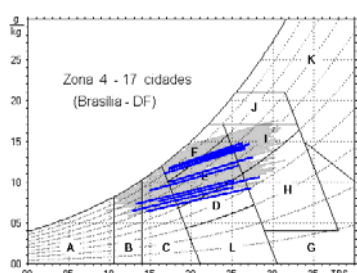


Figura 2.19: Carta Bioclimática para a zona 4.

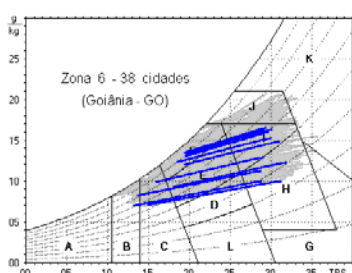


Figura 2.20: Carta Bioclimática para a zona 6.

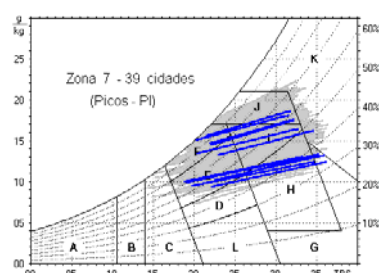


Figura 2.21: Carta Bioclimática para a zona 7.

Tabela 2.2: Estratégias de Condicionamento Passivo segundo a Carta Bioclimática de Givoni. Adaptado de: ABNT, projeto 02:135.07-003:1998.

Área	Estratégia de Condicionamento Térmico Passivo
A	Roupas pesadas, Aquecimento artificial
B	Aquecimento Solar
C	Inércia Térmica de aquecimento
D	Zona de Conforto Térmico
E	Zona de Conforto Térmico (a baixas umidades)
F	Ventilação Seletiva
G	Refrigeração Evaporativa
H	Refrigeração Evaporativa e Inércia Térmica de Resfriamento
I	Inércia Térmica de Resfriamento e Ventilação Seletiva
J	Ventilação Seletiva
K	Roupas leves, Resfriamento artificial
L	Evaporação de Água

### 2.1.8 Benefícios Econômicos dos Sistemas de Refrigeração Evaporativa

Segundo Leong (2001), são necessários apenas 7kWh para diminuir em 10 graus-dia a temperatura de um determinado ambiente. Szokolay (1995) define grau dia

como um parâmetro climático definido como o somatório das diferenças de temperatura, quando se encontram acima ou abaixo de um temperatura tomada como base. Esse conceito permite quantificar os valores de energia de aquecimento ou refrigeração tendo determinada temperatura como referência.

Um refrigerador evaporativo, não um sistema, consome em média um quarto da energia elétrica necessária ao funcionamento de um aparelho convencional de condicionamento do ar. Leong (2001) avaliou os custos de operação de um Sistema de Refrigeração Evaporativa Direta em um terço a um quinto dos custos de operação de um sistema convencional de refrigeração do ar.

Smith (1993) afirma ser economicamente viável a aplicação de sistemas de aspersão de água sobre condições climáticas adequadas em coberturas de edifícios de pavimento único. O autor sugere a aplicação do sistema sob as seguintes situações: fase de projeto; manutenção e reforma da cobertura; como adição ao projeto de condicionamento convencional do ar; como adição à reformulação dos sistemas de refrigeração do ar; quando se tem como meta a redução no consumo de energia e como auxílio a sistemas de ventilação.

Segundo reportagem do governo da Índia em 1984 (fonte: Sodha; Sawhney e Desbmukh, 1989), sistemas de refrigeração consomem 500 MW (Mega-Watts) de energia durante o verão no país.

Sodha, Sawhney e Desbmukh (1989) analisaram em Nova Delhi (Índia) o potencial de economia de energia e a redução percentual nos custos com refrigeração em um cinema. Inseriu-se sobre a cobertura, sistema de aspersão de água. Segundo os resultados, o sistema convencional de condicionamento do ar do cinema em questão, apresentou redução de 16% no consumo de energia, após a implantação do sistema de aspersores. Concluiu-se que o sistema de aspersores associado ao método convencional de condicionamento do ar apresentara redução de 14% em seu investimento inicial e redução de 17% no custo anual de energia para refrigeração do ambiente citado.

## **2.2 O Processo Físico da Refrigeração Evaporativa**

O processo de evaporação da água é um fenômeno de alta complexidade, depende das variáveis termodinâmicas que compõem um ambiente. O presente trabalho avaliará o fenômeno em ambientes abertos, especificamente o processo

evaporativo em superfícies, no caso, coberturas de edifícios, que têm como principais variáveis a temperatura e pressão do ar e as condições de vento.

Segundo Givoni (1994), em situação “adiabática”, onde não há troca de calor ou umidade do ambiente com elementos externos ao sistema, a evaporação da água diminui a temperatura do ar e eleva a Taxa de Umidade sem que haja extração de calor do mesmo. O total de energia (calor sensível + calor latente) se mantém constante.

Na prática, o processo de evaporação não é completo devido às interferências de radiação e convecção externos a um determinado sistema. Geralmente, a Diferença Psicrométrica é cerca de 20 a 40% maior que a diferença entre a TBS final e a TBU inicial (constante) (Givoni, 1994). Em situações práticas, determina-se uma taxa de eficiência de 60 a 80% do processo de Refrigeração Evaporativa. A essa taxa de eficiência se denomina Eficiência Refrigerativa (EfRef) segundo González (1997) (Equação 2.4).

$$Ef\ Ref = \frac{\Delta TBS}{\Delta TBU} \quad \text{Equação 2.4}$$

Fonte: González, 1997.

Em resumo tem-se:  $TBS_{final} = TBU_{inicial} + (20 \text{ a } 40\% \text{ da dif. psicrométrica})$

### 2.2.1 Cálculo do Potencial de Refrigeração Evaporativa

O foco deste trabalho é a avaliação do fenômeno evaporativo em coberturas de barro e de fibrocimento umedecidas por meio de aspersão de água.

A Taxa de Evaporação de uma superfície com água pode ser calculada do seguinte modo (Equação 2.5 e Equação 2.6):

$$Ev = 0.003 \times (PVS - PVA) \times (1 + 0.38V) \quad \text{Equação 2.5}$$

$$Pe = \frac{Ev \times S \times 2.400}{86.400} \text{ kW} \quad \text{Equação 2.6}$$

Fonte: González, 1997.

**PVA** – Pressão de Vapor Atual (Pa);

**PVS** – Pressão de Vapor do ar Saturado (Pa);

**S** – Área da superfície com água (m<sup>2</sup>).

**V** – Velocidade do Vento (m/s).

### 2.2.2 A Refrigeração Evaporativa em Edificações

Segundo Givoni (1994), a TBU é, teoricamente, a temperatura mais baixa que os sistemas de evaporação direta podem proporcionar ao ambiente. Na prática, a temperatura do ar refrigerado por evaporação é mais alta que a TBU, girando em torno de 20 a 30% da diferença psicrométrica.

Em valores médios, a diferença psicrométrica nos momentos de temperaturas de pico em regiões áridas varia entre 10 e 15°C, em regiões desérticas entre 15 e 20°C (Givoni, 1994).

A combinação de elevada umidade do ar e elevada velocidade do ar, fixa o limite para ambientes internos entre 26°C e 28°C. Os sistemas de refrigeração evaporativa direta devem ser aplicados em regiões ou estações em que a TBU do ambiente não ultrapasse os 22°C. (Givoni, 1994).

Se a umidade relativa é alta, o ar está próximo da saturação, ou seja, não é mais capaz de promover a evaporação da água. Ao inserir partículas de água em ambiente saturado, o vapor contido no ambiente condensará, transformando o calor latente – energia que mantém a água em estado de vapor – em calor sensível, que em contato com a pele é percebido pelo corpo humano. Esse processo, além de inutilizar o sistema de refrigeração, contribui negativamente ao conforto.

## 3 Descrição dos Experimentos

---

O capítulo 3 aborda a descrição metodológica da parte experimental deste trabalho, bem como a identificação dos locais de monitoramento, os instrumentos utilizados e os critérios de tratamento dos dados. Os experimentos se subdividem em três: o experimento piloto, o experimento em laboratório e o experimento em campo.

Monitorou-se no experimento piloto uma laje de concreto coberta com água em época de verão. O experimento em laboratório compreendeu uma bancada de testes onde se avaliou o comportamento de telhas de barro e de fibrocimento submetidas a uma fonte artificial de calor e sucessivos gotejamentos de água sobre suas superfícies externas. Utilizou-se no experimento em campo outra bancada de testes para avaliar o comportamento térmico de telhas de barro e de fibrocimento expostas ao sol, submetidas ao gotejamento de água, levando-se em conta o vento e radiação solar.

O método de análise utilizado foi comparativo e estatístico. Em todos os monitoramentos apresentados, o fenômeno de refrigeração evaporativa foi comparado com dados monitorados em condições semelhantes, obtidos simultaneamente sem o uso da água. Análises estatísticas foram feitas com o intuito de demonstrar comparativamente o efeito refrigerador da evaporação da água, bem como identificar as relações de causa e efeito provocadas pelas variáveis ambientais.

### **3.1 Identificação dos locais de monitoramento**

A parte experimental deste trabalho foi realizada em duas cidades do Estado de São Paulo: em Araraquara efetuou-se o experimento piloto e o experimento em laboratório. Em São Carlos, o experimento em campo. Araraquara possui as coordenadas de latitude de 21° 47', longitude de 48° 10' e altitude média de 650m. São Carlos localiza-se na latitude de 22° 17' sul, longitude de 48° 10' oeste e altitude média de 800m (Figura 3.1).



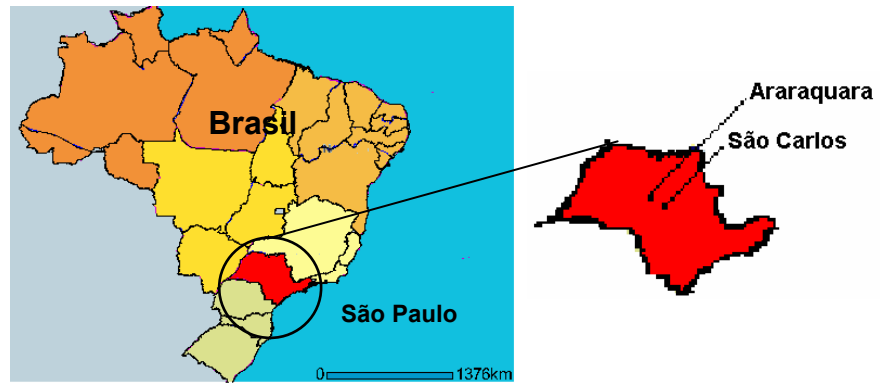


Figura 3.1: Localização das cidades de Araraquara e São Carlos. Adaptado de IBGE, 2005.

O clima local é considerado tropical de altitude, que, segundo a classificação de Koeppen, é o Cwa, clima quente com inverno seco, no qual a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18°C e a do mês mais quente ultrapassa 22°C. O total das chuvas do mês mais seco não atinge 30 mm, e o do mês mais chuvoso atinge valores dez ou mais vezes maiores do que os do mês mais seco. O período seco dura de junho a agosto, embora na prática varie num período de seis meses (junho a novembro, com déficit hídrico mais intenso, ou de abril a setembro, considerando o período com menos chuvas) (EMBRAPA, 2004).

Adotando-se as diferenças psicrométricas de um dia típico de verão, no mês de Fevereiro às 14 horas, Araraquara apresenta eficiência de umidificação (EfU) (Equação 2) de 51%.

É comum na região a ocorrência de períodos favoráveis ao uso dos sistemas de refrigeração evaporativa. Conforme estudo realizado por Roriz (2000), as cidades de São Carlos e Araraquara situam-se em uma região onde, em um dia típico de fevereiro (verão), as diferenças psicrométricas médias podem atingir entre 7.5 e 8.0 °C, condição observada em 51% do território do Estado de São Paulo (Figura 3.2).

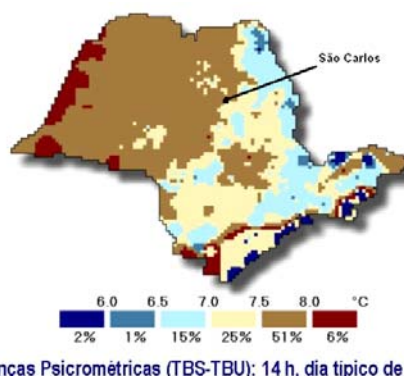


Figura 3.2: Diferenças Psicrométricas típicas às 14 horas de um dia de verão no Estado de São Paulo. (Adaptado de Roriz, 2000)

### 3.2 Experimento Piloto: Análise de Espelho d'Água sobre Laje de Concreto

O Experimento Piloto foi feito no Campus da UNESP em Araraquara, na Faculdade de Ciências e Letras (Figuras 3.3 e 3.4), Latitude 21°47', Longitude 48°10' e Altitude média de 650m acima do nível do mar. O edifício apresenta espelho d'água sobre laje de cobertura e, praticamente não recebe radiação solar direta nas fachadas. As circulações são externas, resultando em um beiral de aproximadamente 6 metros que impede a incidência de radiação solar direta nas fachadas. As medições duraram 8 (oito) dias. O período da medição foi de 0:00h do dia 12 de Fevereiro à 0:00h do dia 20 de Fevereiro de 2004.



Figura 3.3: EA – Espelho d'água analisado.



Figura 3.4: LC – Laje Comum analisada.

O edifício escolhido permite averiguar o desempenho da evaporação da água, em situação e escala real de uso, considerar a radiação solar direta somente na cobertura, sem sombras de edifícios vizinhos. No caso, é possível desconsiderar a carga térmica proveniente dos usuários. Sob as mesmas soluções construtivas, têm-se condições de cobertura distintas, uma com água, outra sem; permitindo análise de maior precisão quanto aos efeitos térmicos da evaporação da água no módulo experimental, sem descontos de diferentes trocas térmicas no módulo de referência. As características do edifício são apresentadas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Comparativo das Características das Lajes.

**Comparativo das Características das Lajes em questão.**

	<b>Espelho d'Água (EA)</b>	<b>Laje Comum (LC)</b>
Pé-direito	3,60 m	3,60 m
Área do Compartimento	288 m <sup>2</sup>	60 m <sup>2</sup>
Uso do ambiente	AUDITÓRIO	DEPÓSITO
Descrições construtivas	Laje plana de 12cm de espessura, em concreto armado, com pintura epóxi azul clara e espelho d'água com espessura de 5cm.	Laje plana de 12cm de espessura em concreto armado sem revestimento e placas de concreto de 1mx1m, espessura de 4cm justapostas sobre a laje.

Obs: Ambos os ambientes não foram utilizados durante o período do experimento e estavam fechados.

Um sensor específico do equipamento foi isolado do contato com o ar com poliestireno expandido e fixado na laje para que se obtivesse o valor de sua temperatura superficial. Aplicou-se pasta térmica para aumentar o contato com a superfície. Três compartimentos metálicos com furos abrigaram os termômetros que registravam a temperatura superficial (Figura 3.1 e Figura 3.2).

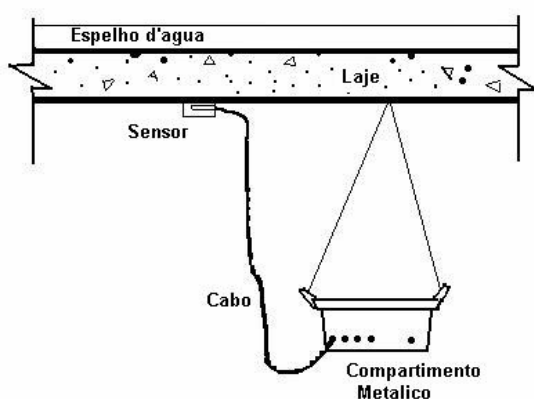


Figura 3.1: Croqui de Instalação do Equipamento na laje EA.

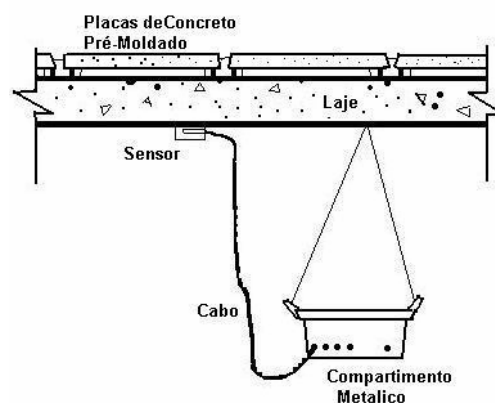


Figura 3.2: Croqui de Instalação do Equipamento na laje LC.

Os termômetros HOBO foram utilizados em três unidades: O primeiro aferiu a TBS e umidade do ar exterior; o segundo aferiu a Temperatura Superficial Interna da laje com água (EA), a TBS interior do ambiente e sua umidade relativa. O terceiro aferiu a Temperatura Superficial da laje comum (LC), a TBS Interior e a Umidade Relativa.

### 3.3 Experimento em Laboratório: Bancada com Telhas de Barro e de Fibrocimento

O experimento em laboratório foi feito em Araraquara-SP no período de Outono e Inverno, entre Maio e Agosto de 2004. Para a execução do experimento, montou-se sobre uma bancada de concreto (Figura 3.3 e Figura 3.4), um conjunto formado por dois refletores de 500W, 127V fixados à parede, utilizados como fonte de calor, instalados a 11 cm de distância das telhas. Quatro ripas de madeira recebiam os pares de telhas. A bancada situava-se em ambiente protegido da radiação solar direta e das cargas de vento, porém sujeita às variações de temperatura e umidade do ar.

As medições foram feitas em duas telhas de mesmo lote, fixadas lado a lado. A primeira telha era mantida seca (sem gotejamento). Na segunda telha, efetuou-se gotejamento de água sobre a face externa, em intervalos de dez minutos, durante uma hora. Mediu-se nesse experimento, as temperaturas superficiais internas de um par de

telhas por vez, sendo uma sem gotejamento outra com gotejamento de água sobre sua face externa. As medições foram feitas em intervalos de 5 minutos durante duas horas.

Analisou-se a correlação entre os dados obtidos pela diferença das temperaturas superficiais internas entre as telhas seca e úmida ( $\Delta$ SUP) e as diferenças psicrométricas ( $\Delta$ PSI) aferidas.

Armelin e Cherry (2004) fizeram experiência semelhante no Lafarge Roofing Technical Center , LTRC, localizado em Crawley, Inglaterra. Foram construídos dois aparatos com área de 1,5 m por 1,5 m que permitem a montagem de diferentes configurações de cobertura. Os autores utilizaram 30 lâmpadas, com potência de 500W cada, como fonte de calor. (eMat, vol. 1, n.1, p. 79-82, Maio 2004)

A bancada situava-se em ambiente aberto, protegido da radiação solar direta e das cargas de vento, porém sujeita às variações de temperatura e umidade do ar.



Figura 3.3: Bancada Experimental com telhas de Fibrocimento.



Figura 3.4: Bancada Experimental com telhas de Barro.

Telhas utilizadas: - Telha de barro do tipo Portuguesa medidas 40,5cm x 22cm e 30 mm de espessura. – Telha de fibrocimento, medidas 50,5cm por 24,5cm e 4mm de espessura.

Secagem das Telhas: antes das medições na bancada, as telhas iam ao forno por duas horas à temperatura aproximada de 285°C para a perda da umidade retida em seu interior. Ao retirá-las do forno, eram depositadas em local fechado para que estabilizassem à temperatura ambiente e pudessem passar ao processo de medição. Todas as telhas utilizadas nas medições foram coletadas em depósitos revendedores, sem um controle prévio de fabricação. O objetivo foi analisar de maneira genérica o material que é repassado ao consumidor, sem interferências em seu processo normal de fabricação.

Confirmação do processo de secagem: antes de se efetuar as aspersões, as telhas eram submetidas à uma hora de teste, recebendo o calor dos refletores sem aspersão de água para que se confirmasse o aquecimento uniforme de ambas. Os primeiros experimentos feitos sem a secagem das telhas, acusaram diferenças de temperaturas superficiais de até 18°C em telhas cerâmicas de mesmo lote de fabricação, pois apresentavam volumes diferentes de água retida em seu interior. Portanto, o processo evaporativo acontecia antes mesmo das aspersões serem efetuadas. Verificou-se a massa das telhas após a secagem por três dias consecutivos, as mesmas apresentavam diferenças de massa de no máximo 5 gramas entre as duas.

Instalação dos instrumentos: os sensores de temperatura foram fixados à superfície das telhas como apresentado na Figura 3.5. Aplicou-se pasta térmica para melhorar o contato entre o sensor e a superfície medida. Em seguida, o sensor era envolvido por poliestireno expandido de 2 cm de espessura e fixado à telha com fita aluminizada.

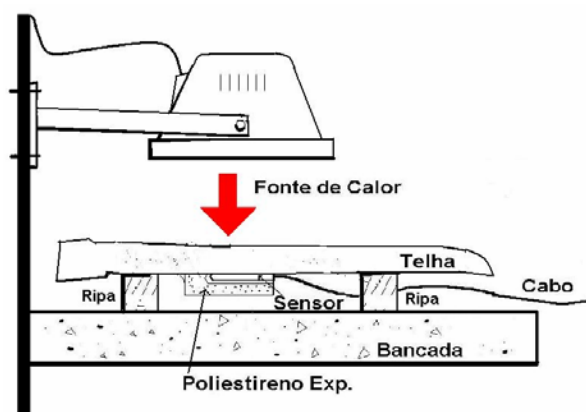


Figura 3.5: Croqui de instalação dos instrumentos nas telhas

Instalação das telhas: as telhas eram simplesmente apoiadas sobre as ripas, sem fixação e na posição horizontal (paralela à fonte de calor). Entre as ripas de madeira instalou-se folha de poliestireno expandido de 0,5 cm de espessura e folha de alumínio para minimizar as trocas térmicas por radiação da telha com a bancada.

Procedimento do gotejamento: após alguns testes, verificou-se que o volume ideal para que se cobrisse toda a telha com água era de 120 ml de água por hora, em gotejamentos com intervalos de 10 minutos, no total de 6 de 20 ml cada. Quantidades maiores de água escorriam pelas laterais e pela frente da telha. Quantidades menores de água dificilmente cobriam toda a superfície externa da telha. Constatou-se que a aspersão de água ideal sobre as telhas era em intervalos de 10 minutos, pois, em

intervalos maiores, a telha voltava a sofrer aumentos significativos de temperatura. Em intervalos menores, não era possível a total evaporação do volume de água aplicado, logo, parte da água escorria para fora da superfície da telha. A água foi gotejada sobre as telhas por meio de um conta-gotas para que chegasse à telha em forma de gotículas, facilitando o processo de evaporação.

### 3.4 Experimento em Campo: Bancada com Telhas de Barro e de Fibrocimento

As medições foram feitas em duas telhas situadas lado a lado. Uma delas era mantida seca, enquanto a outra recebia o gotejamento de água sobre sua face externa, em intervalos de dez minutos, durante seis horas (Figuras 3.8 e 3.9). Durante o experimento, a cada 5 minutos foram medidas as temperaturas superficiais internas de ambas as telhas, bem como as temperaturas e umidades do ar. As temperaturas e umidades foram obtidas por sistema eletrônico automático de aquisição de dados (HOBO).



Figura 3.6: Bancada utilizada



Figura 3.7: Detalhe da inclinação da bancada

Sobre uma bancada de madeira, apoiou-se as duas telhas em questão, sendo estas inclinadas em 30% (aproximadamente 22°). A bancada orientava-se ao Norte, sem que nenhuma barreira física impedisse a circulação do ar e a incidência de radiação solar direta, portanto, sujeita às variações de temperatura e umidade do ar.

Com base nos dados obtidos, procurou-se identificar correlações entre as diferenças das temperaturas superficiais internas das telhas seca e úmida e os parâmetros psicrométricos registrados.

Telhas utilizadas: telha cerâmica: 40.5cm x 22cm e 15 mm de espessura.

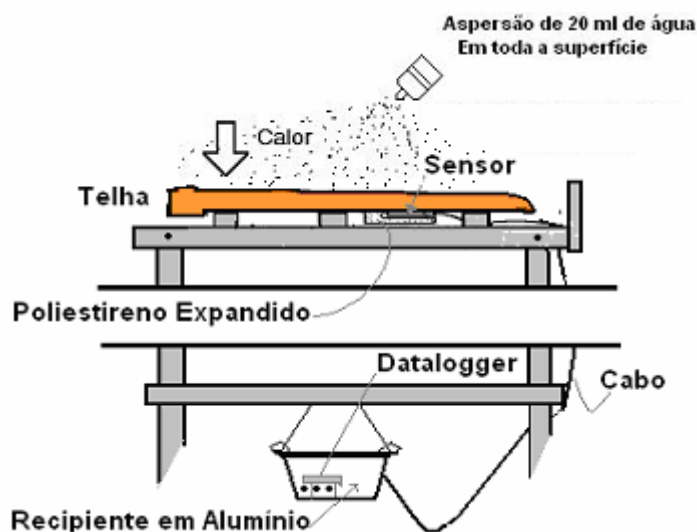
Antes das medições na bancada, as telhas eram colocadas em estufa por seis horas à temperatura aproximada de 80°C para a perda da umidade retida em seu



interior. Ao retirá-las da estufa, eram depositadas em local fechado, para que estabilizassem na temperatura ambiente antes do processo de medição. Todas as telhas utilizadas nas medições foram coletadas aleatoriamente em depósitos revendedores.

Assim como ocorreu no teste em laboratório, antes de se iniciar o gotejamento, as telhas eram submetidas à uma hora de teste, sob o calor do Sol, para confirmar o aquecimento uniforme de ambas. Este cuidado foi tomado após os primeiros experimentos, realizados sem a secagem prévia das telhas, quando se percebeu que, mesmo antes do gotejamento, as telhas de barro já apresentavam diferenças de até 12°C em suas temperaturas superficiais, motivadas por diferentes teores de umidade.

Os sensores de temperatura foram fixados à superfície inferior das telhas (Figura 3.10) e protegidos por poliestireno expandido, sendo que o único contato direto era com a superfície da telha. Aplicou-se pasta térmica para facilitar as trocas térmicas entre a superfície e o sensor, sendo este fixado por meio de fita aluminizada. As telhas eram simplesmente apoiadas sobre as ripas, sem fixação.



**Figura 3.8: Esquema de instalação dos instrumentos**

Utilizou-se um conta-gotas para controlar a quantidade de água aplicada sobre a telha. A primeira preocupação foi identificar um fluxo adequado para o gotejamento. Após alguns testes, verificou-se que o fluxo ideal de água para cobrir toda a telha era de 120 ml por hora, em gotejamentos com intervalos de 10 minutos, totalizando 6 de 20 ml cada, por hora. Volumes maiores de água provocavam escoamento pelas bordas da telha e volumes menores não cobriam toda a sua superfície externa. Para o volume de 20 ml, intervalo maior que 10 minutos fazia com que a temperatura da telha

úmida voltasse a subir entre os gotejamentos, indicando que toda a umidade já havia sido retirada e o processo de evaporação fora interrompido. Por outro lado, intervalos menores provocavam excesso de água, que escorria pelas bordas da telha. É necessário considerar que este fluxo ideal de água depende das condições climáticas de cada dia, sendo que os valores encontrados correspondem às condições médias do período.

Não foram considerados neste trabalho os coeficientes de absorvância e as densidades das telhas, pois o processo de umedecimento gradual das mesmas torna estes dados variáveis, inconstantes. Logo, não se dispunha de meios seguros de aferição, dada a mudança de cor da telha úmida e o acréscimo de água em seu interior ao longo do processo de medição.

### 3.5 Instrumentos Utilizados

**Hobo H08-004-02** (3 aparelhos): Registra e armazena dados de temperatura, umidade e iluminância – Armazena até 7943 dados, com tempo programável de início e intervalo das medições (Figura 3.11).



Figura 3.9: Hobo H08-004-02.

**Termômetro de Mercúrio** – marca Incoterm: precisão de 0,1°C – registra de 10°C negativos até 110°C (Figura 3.12).



Figura 3.10: Termômetro Incoterm.

**Pasta Térmica** – marca Implastec: melhora o contato térmico do sensor (bulbo ou cabo) com a superfície a ser analisada (Figura 3.13).





Figura 3.11: Pasta Térmica Implastec.

**Refletores de 500W, 110V** – marca FLC: são as fontes de calor utilizadas nos experimentos em bancada (Figura 3.14).



Figura 3.12: Refletor de 500W marca FLC.

**Utensílios de apoio aos instrumentos:** foram utilizados poliestireno expandido, folha aluminizada e fita Tec-Tape cor prata para proteção contra radiação externa, influências térmicas do ar e sustentação dos instrumentos em contato com as telhas.



Figura 3.13: Poliestireno expandido, folha aluminizada e fita Tec-Tape.

### **Instrumentos Computacionais de Captação e Análise de Dados:**

Programa especializado em registrar, processar e armazenar os dados obtidos pelo termômetro eletrônico, por emissão de gráficos e tabelas.

PSICROM 1 (RORIZ): ferramenta utilizada para a análise psicrométrica dos dados obtidos nas três etapas de medições. Emite tabelas e gráficos.

Utilizou-se programa de computação especializado em análises estatísticas de resultados.

**Metodologia de Análise de dados**

Efetuuou-se a correlação entre os dados obtidos pela diferença das temperaturas superficiais internas entre as telhas seca e úmida ( $\Delta$ SUP) e as diferenças psicrométricas ( $\Delta$ PSI) aferidas. Esta correlação foi feita por meio de Análise de Regressão Múltipla

## 4 Apresentação e Discussão dos Resultados

---

O capítulo 4 apresenta os dados obtidos nos monitoramentos e as análises estatísticas das medições. Em conjunto, discute-se os desempenhos térmicos no caso de uma laje com espelho d'água, de telhas de barro e de fibrocimento - em laboratório e em campo - quando submetidas à aplicação de água sobre suas superfícies externas.

### 4.1 Experimento Piloto

Os dados do experimento piloto foram coletados em oito dias de medição na semana de 12 a 19 do mês de Fevereiro de 2004. Os dados climáticos registrados na região confirmam o período quente e úmido, comum no verão de climas tropicais de altitude como é o caso da cidade de Araraquara-SP, onde se situa o Campus da UNESP, local do monitoramento.

#### Dados Climáticos

A Tabela 4.1 apresenta os valores máximos e mínimos de temperatura e de umidade relativa dos ambientes monitorados:

Tabela 4.1: Temperatura e umidades relativas obtidas de 12 a 19 de Fevereiro de 2004.

Variáveis	Dias							
	12	13	14	15	16	17	18	19
Temperatura Máxima (°C)	27,5	28,3	24,4	26,3	27,5	28,7	29,1	29,5
Temperatura Média (°C)	24,7	25,5	23,3	23,5	25,1	26,1	26,6	26,7
Temperatura Mínima (°C)	21,7	22,5	22,1	21	22,9	23,2	22,5	24,4
Umidade Relativa Máxima (%)	84,3	77	96,2	100	93,8	79,3	76,3	74,7
Umidade Relativa Mínima (%)	51,2	53,9	67,9	75,3	57,6	55	50,5	55,2
Precipitação Pluviométrica (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0

De posse dos resultados, verificou-se oscilação entre os dias 14 e 16 (Figura 4.1), causada pelo aumento da nebulosidade, provável resultado de entrada de frente fria. Não houve precipitação no local durante o monitoramento.

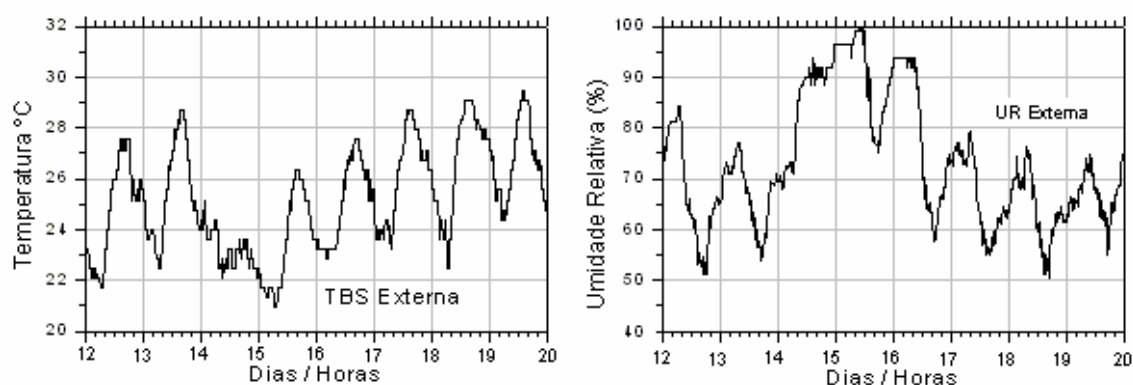


Figura 4.1: Temperatura e Umidade Relativa no período de 12 a 19 de Fevereiro.

Os dados comparativos a serem demonstrados a seguir referem-se ao período entre 16 e 19 de fevereiro por apresentarem curvas semelhantes de variação de temperaturas superficiais e do ar (interno e externo).

#### Dados obtidos na Laje Comum - LC

A Figura 4.2 apresenta os dados de temperatura superficial e a TBS coletados na laje LC, conforme demonstrado no capítulo anterior. O sensor térmico foi aplicado diretamente na superfície interna da mesma, protegido do contato com o ar.

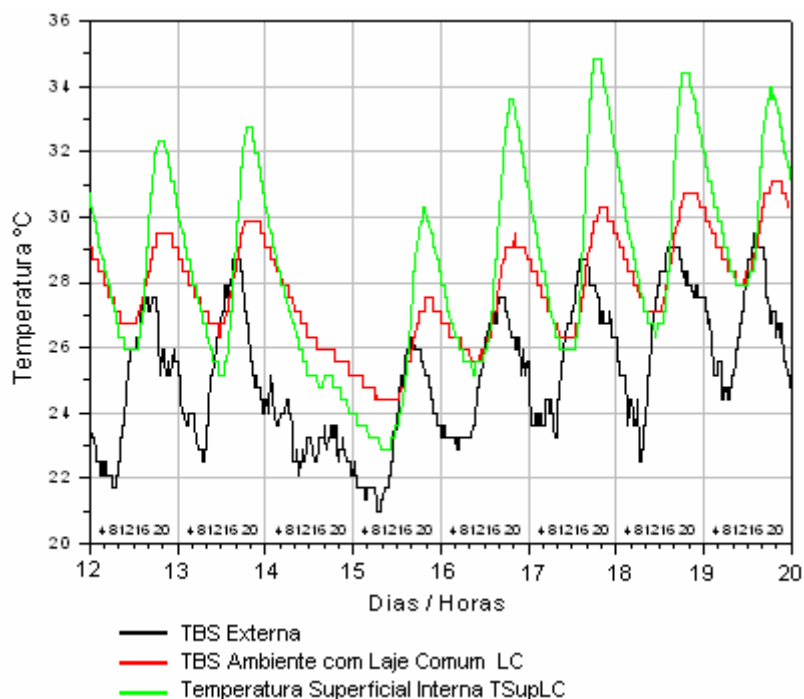


Figura 4.2: Temperaturas do Ar e Superficiais na Laje Comum LC.

A Tabela 4.2 apresenta os valores máximos e mínimos de temperatura e de umidade relativa do ambientes com Laje Comum:

Tabela 4.2: Temperaturas máximas e mínimas superficiais e do ar (LC).

Dia	TbsExtMax	TbsExtMin	TbsIntMax	TBSIntMin	SupMax	SupMin
12	27,5	21,7	29,5	26,7	32,3	26
13	28,3	22,5	29,9	26,3	32,8	25,2
14	24,4	22	29,1	25,2	30,3	24
15	26,3	21	27,5	24,4	30,3	22,9
16	27,5	22,9	29,5	25,6	33,6	25,2
17	28,7	23,2	30,3	20,3	35	26
18	29,1	22,5	30,7	27,1	34,4	26,3
19	29,5	24,4	31,1	27,9	34	27,9

### Dados obtidos na Laje com Espelho d'Água - EA

A Figura 4.3 apresenta os dados de temperatura superficial na laje EA:

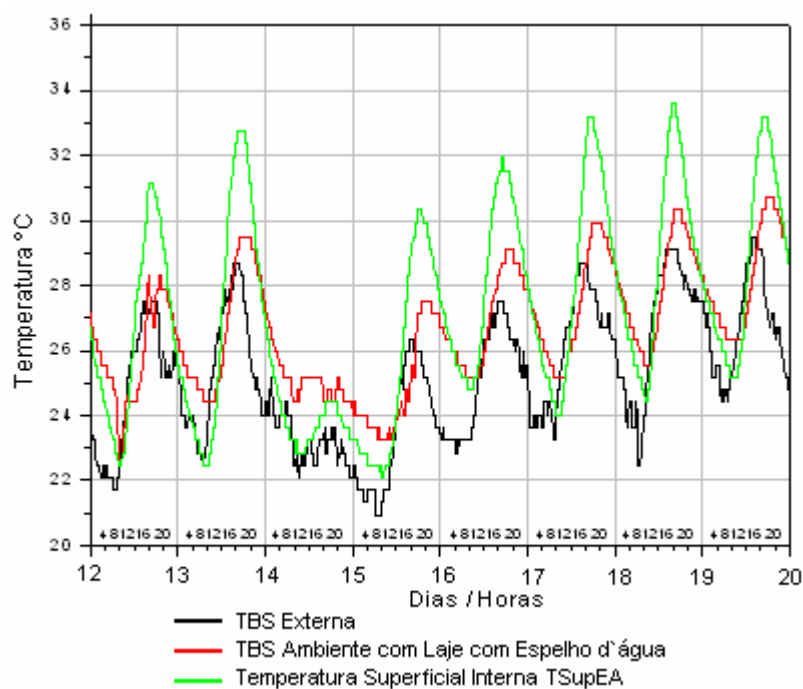


Figura 4.3: Temperaturas do Ar e Superficiais na Laje com Espelho d'água.

A Tabela 4.3 apresenta os valores máximos e mínimos de temperatura e de umidade relativa do ambientes com Laje Comum:

Tabela 4.3: Temperaturas máximas e mínimas superficiais e do ar (LC).

Dia	TbsExtMax	TbsExtMin	TbsIntMax	TBSIntMin	SupMax	SupMin
12	27,5	21,7	28,3	22,5	31,1	22,5
13	28,3	22,5	29,5	24,4	32,8	22,5
14	24,4	22	27,5	24,4	26,7	22,9
15	26,3	21	27,5	23,2	30,3	22,1
16	27,5	22,9	29,1	25,2	31,9	24,8
17	28,7	23,2	29,9	25,7	33,2	24
18	29,1	22,5	30,3	25,6	33,6	24,4
19	29,5	24,4	30,7	26,3	33,2	25,2

#### 4.1.1 Comparação entre a Laje Comum – LC e Laje com Espelho d'Água - EA

A análise comparativa descrita a seguir se restringe ao período entre 16 e 19 de Fevereiro de 2004 (Figura 4.4 e Figura 4.5). O período apresenta curvas de Tbs e UR externas semelhantes, o que não acontece com o período entre 12 e 15 de Fevereiro.

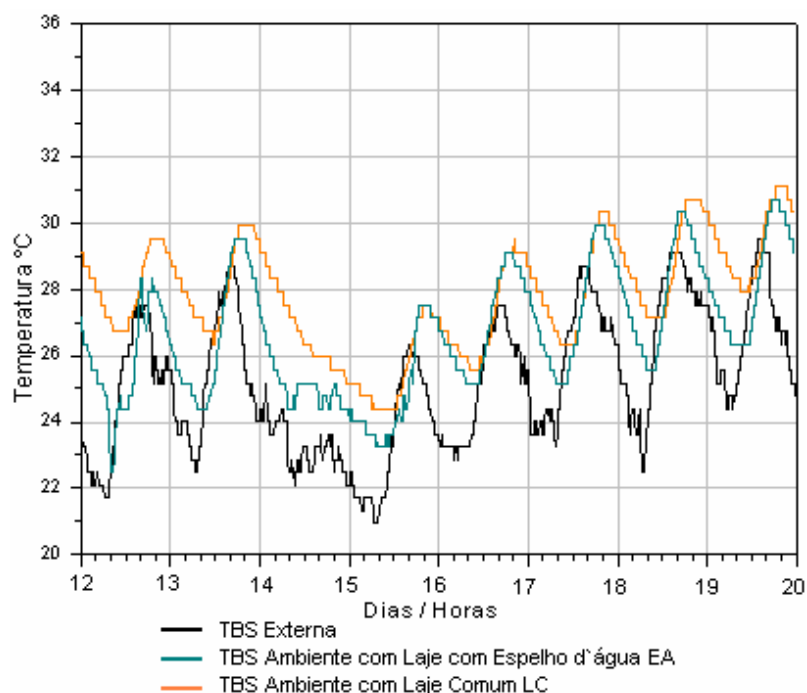


Figura 4.4: Comparativo entre as TBS externas EA e LC. 16 a 19 de Fevereiro de 2004

As médias indicam que por volta das 12:30h até 16:30h a Tbs na laje EA é superior que a da LC (Figura 4.5).

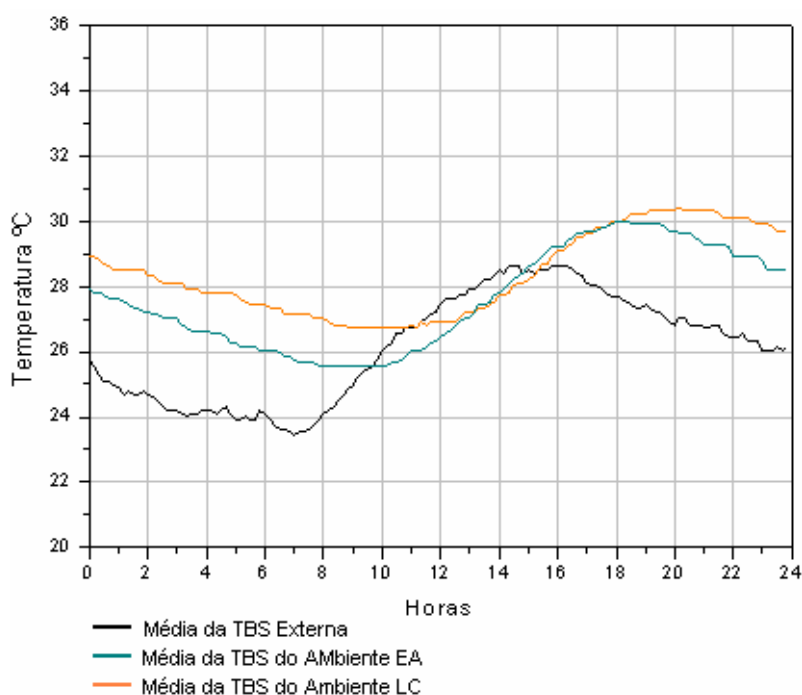


Figura 4.5: Médias de TBS externas dos três dias. Dias 16 a 19 de Fevereiro de 2004.

A Figura 4.6 apresenta as temperaturas superficiais das lajes EA e LC.

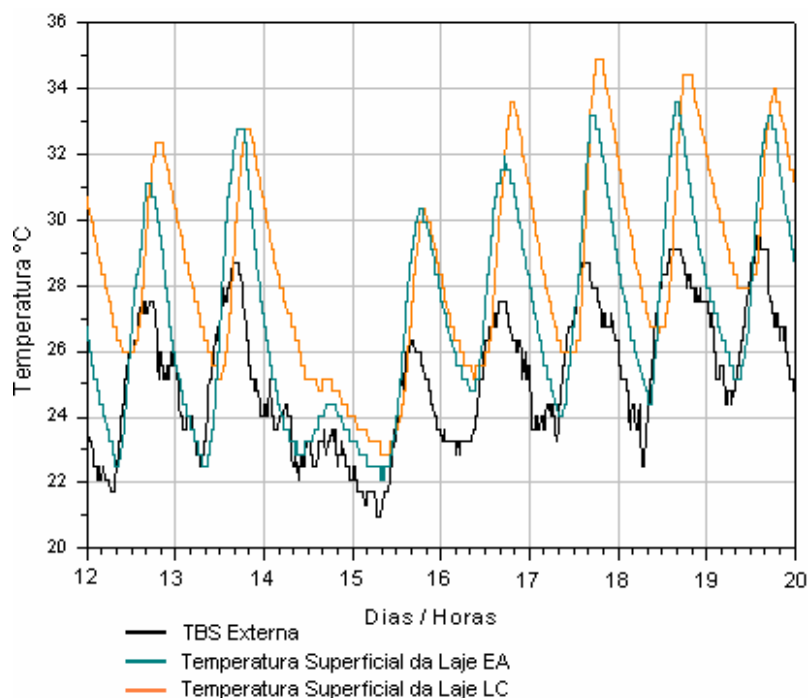


Figura 4.6: Comparativo entre as Temperaturas Superficiais EA e LC.

A Figura 4.7 demonstra que a média das temperaturas superficiais na laje EA é maior que a da LC por volta das 11:00h às 17:00h, horário de uso freqüente do local.

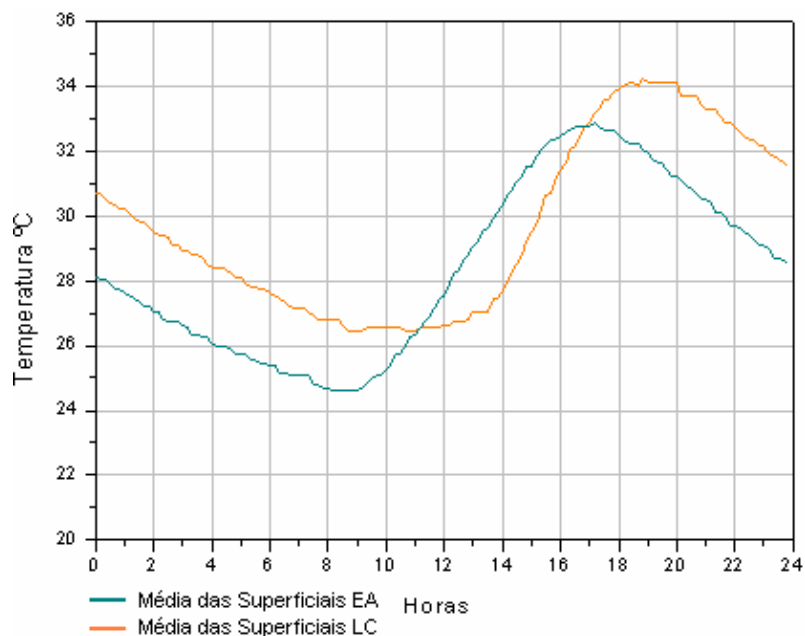


Figura 4.7: Comparativo entre as Médias das Temperaturas Superficiais EA e LC.

Analisando as temperaturas superficiais entre os dias 16 e 19, verifica-se que a temperatura superficial da laje EA é maior que a da LC (Figura 4.8) entre 11:00h e 17:00h, período normalmente com as maiores Tbs do dia. A Laje EA apresenta maior inércia térmica devido à presença de película de água sobre a cobertura.

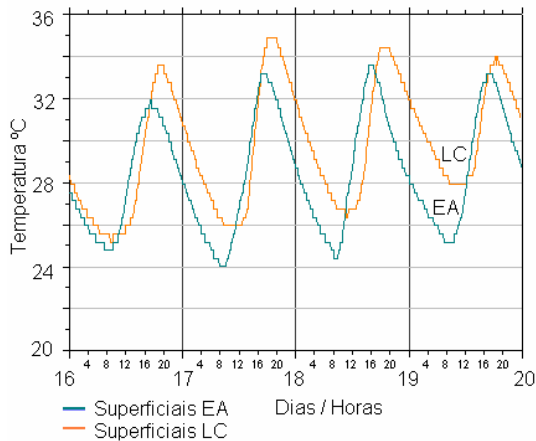


Figura 4.8: Superficiais ao longo das horas. Período de 16 a 19 de Fevereiro de 2004.

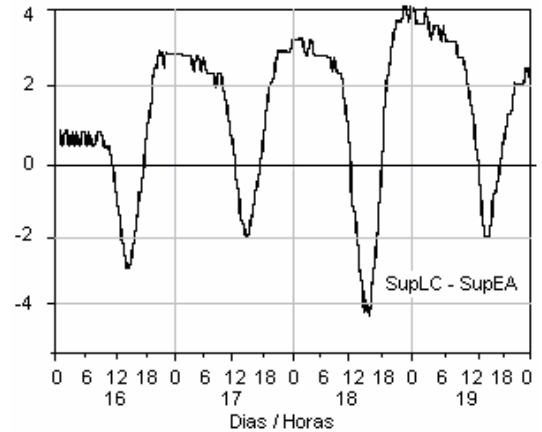


Figura 4.9: Diferença dos  $\Delta T$  no período de 16 a 19 de Fevereiro de 2004.

A diferença entre a temperatura superficial da LC e a temperatura superficial da laje EA é maior em 57 graus-hora (período entre 16 e 19 de Fevereiro). Szokolay (1995) define grau-hora como o déficit da temperatura acumulada a partir de uma ou mais temperatura base. A temperatura superficial da EA é maior que a LC em 37 graus-hora (Figura 4.9). Esses 57 graus-hora são em maioria durante as noites e as manhãs, quando a radiação solar, ou não atua, ou possui pouca intensidade. Por tratar-se de uma Universidade, o edifício é raramente utilizado no período da noite.

Isolando o dia 18/02, com base no comportamento uniforme das curvas de temperatura, verifica-se que das 11:00h às 17:00h, a temperatura superficial da laje EA é maior que a da LC. Por consequência, a TBS no ambiente EA é maior que a TBS do ambiente LC no período de 12h às 18h (Figura 4.10 e Figura 4.11).

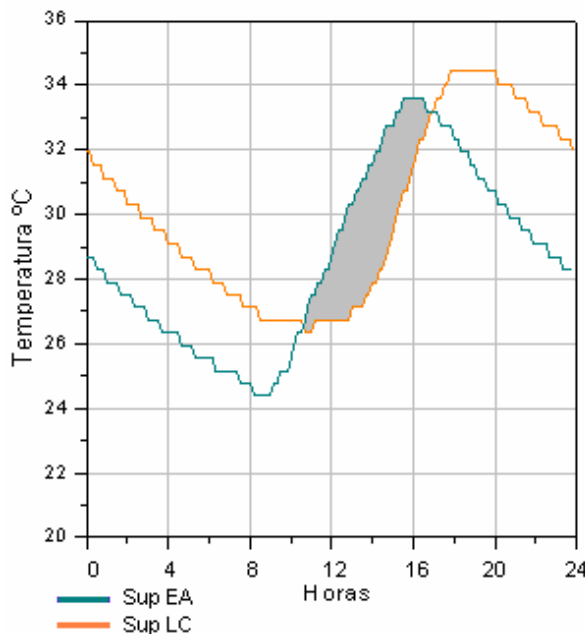


Figura 4.10: Temperaturas Superficiais ao longo das horas (dia 18/02/04).

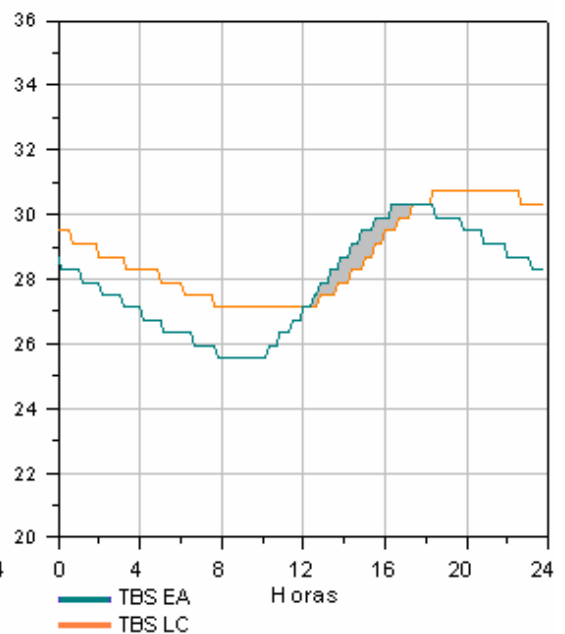


Figura 4.11: Temperaturas de Bulbo Seco ao longo das horas (dia 18/02/04).



A Figura 4.10 e a Figura 4.11 indicam que as mínimas e máximas temperaturas, superficiais e do ar na laje EA são mais baixas em relação à laje comum (LC). Portanto, a quantidade de calor transferido ao interior da edificação é menor. Para a situação de verão em Araraquara-SP, a diminuição das temperaturas mínimas e máximas é satisfatória à região de clima tropical de altitude segundo a NBR 6401.

A água, por ser um elemento que possui alta inércia térmica, provoca um atraso térmico considerável quando absorve o calor proveniente da radiação solar direta. Esse atraso mantém as temperaturas superficiais e do ar na laje EA maiores que as da LC no período das 12:00h às 18:00h (Tabela 4.4 e Tabela 4.5). Esse horário é considerado crítico, pois é nele o uso mais freqüente dos cômodos e, por apresentar em média, as temperaturas externas mais altas do dia.

Tabela 4.4: Ocorrência das máximas temperaturas na laje EA(dia 18/02/04).

Horas das Máximas Temperaturas					
Dia	Text(h)	SupEA(h)	$\Delta$ PSI(h)	$\Delta$ PSI-SupEA (h)	Sup-Text (h)
16	16:30	17:30	19:00	1.5	1
17	15:00	17:30	22:15	4.45	2.5
18	15:30	16:00	18:00	1	0.5
19	14:15	16:30	19:30	3	2.25

Tabela 4.5: Ocorrência das mínimas temperaturas na laje EA(dia 18/02/04).

Horas das Mínimas Temperaturas					
Dia	Text(h)	SupEA(h)	$\Delta$ PSI(h)	$\Delta$ PSI-SupEA (h)	Sup-Text (h)
16	05:00	08:15	09:15	1	3.25
17	07:30	08:30	07:30	-1	1
18	06:45	08:45	06:45	-2	2
19	07:00	08:15	09:30	1.25	1.25

Text – Temperatura Exterior.

SupEA- Temperatura Superficial da Laje com Espelho d'água.

## 4.2 Experimento em Laboratório

O Experimento em Laboratório foi realizado na cidade de Araraquara-SP, nos meses de Julho e Agosto de 2004. Utilizaram-se dois tipos de telha: telhas de barro e telhas de fibrocimento. Estão apresentados neste trabalho os dados obtidos em quatro períodos de monitoramento com telhas de barro e quatro períodos com telhas de fibrocimento. Cada período de monitoramento compreendeu duas horas de medição, onde na primeira hora não aplicou-se o gotejamento de água em uma das telhas, apenas monitorava-se o comportamento térmico de ambas. Em alguns testes feitos, as duas telhas de mesmo material apresentavam diferenças de até 18°C mesmo antes de se aplicar o gotejamento. Provavelmente continham teores de umidade distintos, dificultando a análise dos dados.

### 4.2.1 Experimento em Laboratório com Telhas de Barro

Os dados climáticos registrados confirmam o período frio e seco, típico de inverno de climas tropicais de altitude como a cidade de Araraquara-SP. A Tabela 4.6 apresenta os dados de temperatura e umidade registrados nas quatro medições.

Tabela 4.6: Temperatura e umidade do Ar. Períodos com Telha de Barro.

Variáveis	Medições (períodos de 2 horas)			
	A	B	C	D
Tbs Máxima (°C)	22,8	30,8	29,4	30,2
Tbs Média (°C)	22,7	27,5	29,2	29,5
Tbs Mínima (°C)	22,0	29,3	28,8	28,8
Umidade Relativa Máxima (%)	52,8	34,0	28,56	30,5
Umidade Relativa Mínima (%)	48,2	28,0	27,11	25,3
Médias de ΔPSI	6,7	11,1	12,2	12,5
Precipitação Pluviométrica (mm)	0	0	0	0

A Figura 4.12 ilustra as temperaturas superficiais nos períodos de A até D:

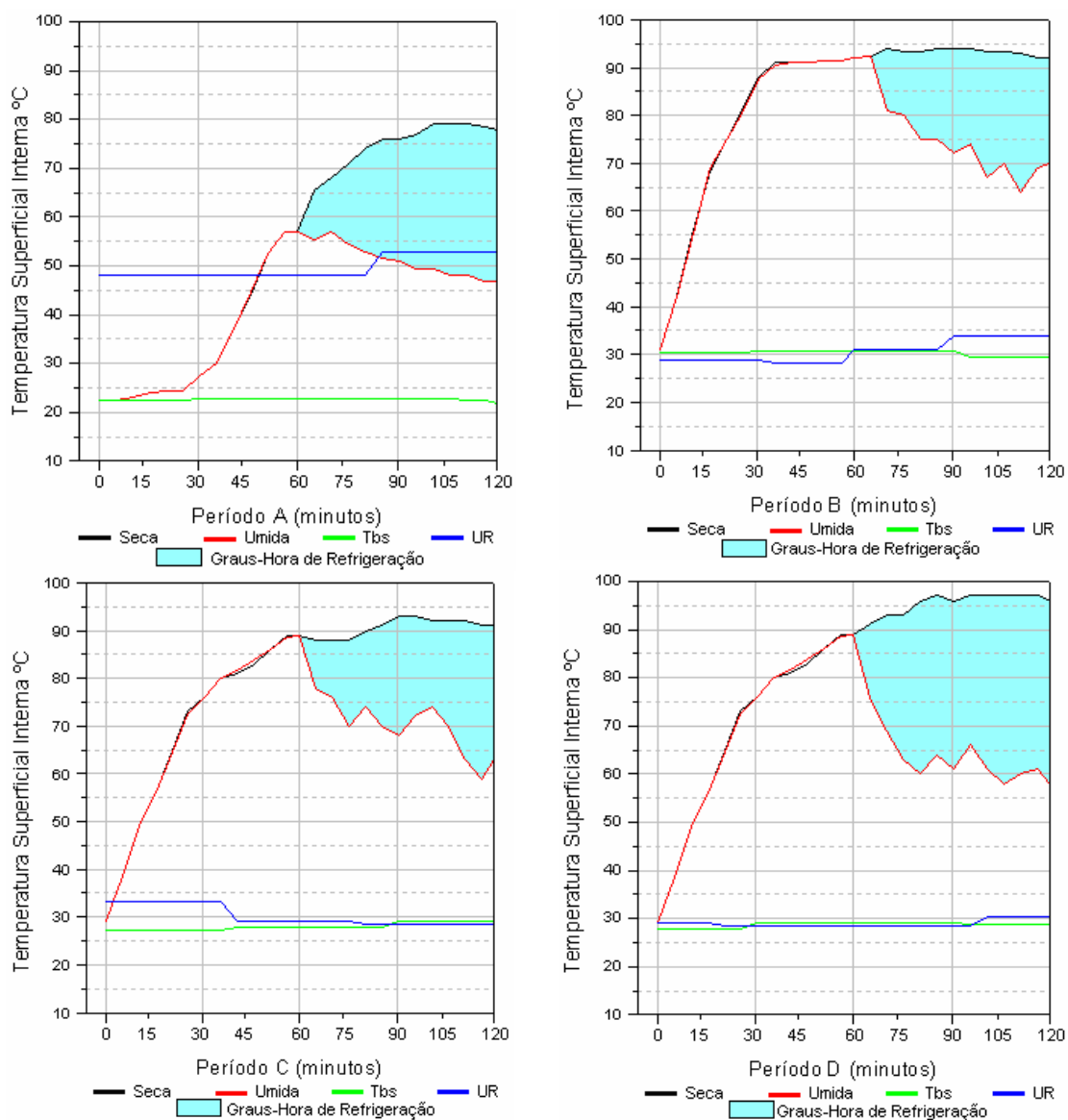


Figura 4.12: Temperaturas Superficiais, Tbs e UR nos períodos de A até D. Telha de Barro.

Como visto na Figura 4.12 a telha de barro seca apresentou temperaturas muito altas, chegando a 96°C. O experimento em campo descrito a seguir, ainda neste capítulo, demonstra que em situações reais isso não ocorre. Os refletores utilizados como fonte de calor nesta simulação promoveram tal situação inesperada.

As médias horárias dos dados obtidos em 4 medições (Tabela 4.7), indicam que, para  $\Delta\text{PSI}$  média de 10.6 °C e TBS média de 27.2 °C, obteve-se 28.3 °C de diferença entre as temperaturas superficiais internas.

Tabela 4.7: Médias Horárias (°C) - Telha de Barro.

Período	TBS	TSS	TSU	$\Delta\text{TS}$	$\Delta\text{PSI}$
A	22,7	74,3	51,4	22,9	6,7
B	27,5	90,6	71,2	19,4	11,1
C	29,2	95,6	61,3	34,3	12,2
D	29,5	95,4	58,9	36,5	12,5
<b>Médias</b>	<b>27,2</b>	<b>89,0</b>	<b>60,7</b>	<b>28,3</b>	<b>10,6</b>

Sendo:

TSS: Temp. superficial interna da telha seca

TSU: Temp. superficial interna da telha úmida

$\Delta\text{TS} = \text{TSS} - \text{TSU}$

Os valores aqui apresentados foram obtidos na época do ano em que geralmente ocorrem as menores umidades relativas na cidade. Além deste aspecto, 2004 foi um ano com umidades particularmente baixas. Dessa maneira, as acentuadas diferenças psicrométricas indicadas na Tabela 4.7 não representam as condições climáticas médias dessa época do ano na região.

### Resfriamento na Telha de Barro

Procurou-se identificar os fatores de maior influência no processo de resfriamento da telha umidificada.

Adotando-se a diferença entre as temperaturas superficiais internas ( $\Delta\text{TS}$ ) como indicador deste resfriamento, a análise de regressão linear múltipla indicou que  $\Delta\text{TS}$  pode ser estimada em função da diferença psicrométrica ( $\Delta\text{PSI}$ ) e da temperatura superficial interna da telha úmida (TSU), conforme a Equação 4.1:

$$\Delta\text{TS} = 61,608 + 3,337\Delta\text{PSI} - 1,166\text{TSU} \quad \text{Equação 4.1}$$

A Equação 4.1 indica que o potencial de refrigeração dos sistemas evaporativos depende das condições psicrométricas ( $\Delta\text{PSI}$ ), mas também das temperaturas da superfície (TSU).

A Figura 4.13 permite comparar as relações entre  $\Delta\text{TS}$  medidas e estimadas pela Equação 4.1, com coeficiente de correlação de 0.93 e desvio padrão de 3.02.

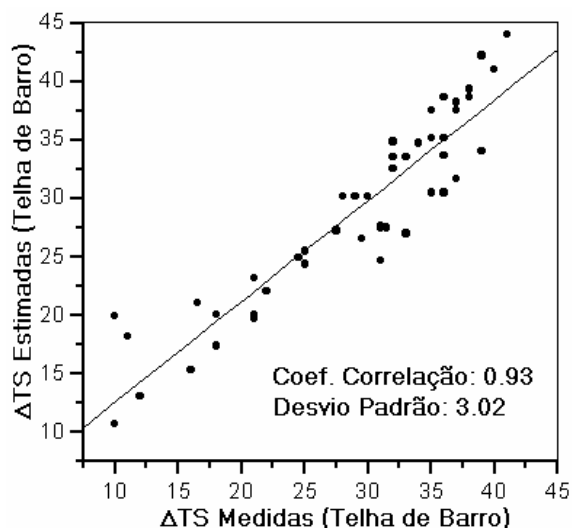


Figura 4.13:  $\Delta$ TS medidas e estimadas pela Equação 4.1. Telha de Barro.

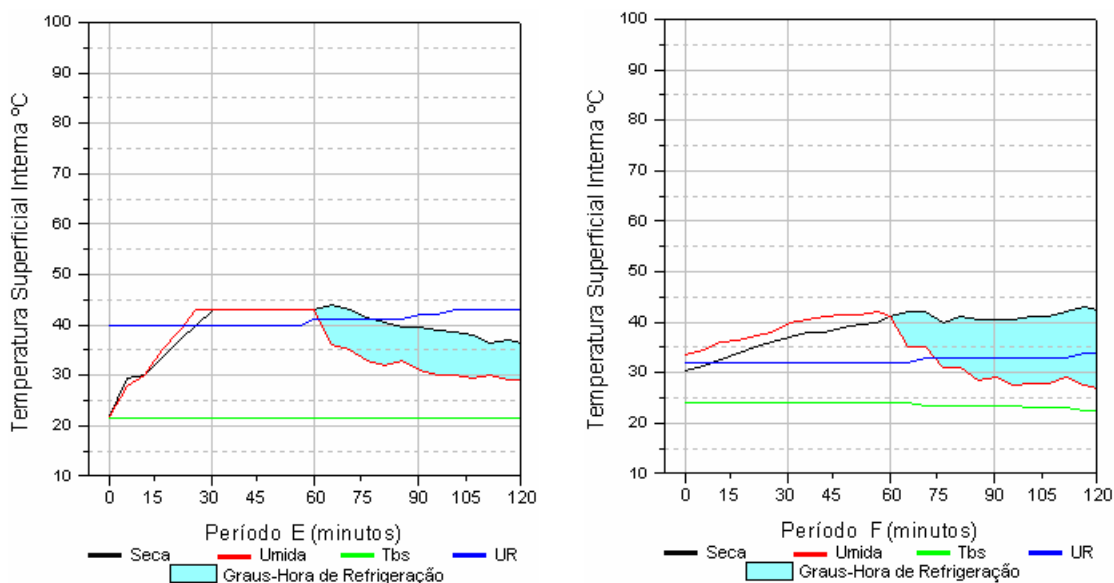
#### 4.2.2 Experimento em Laboratório com Telhas de Fibrocimento

Os dados climáticos registrados também confirmam o período frio e seco, típico de inverno de climas tropicais de altitude. A Tabela 4.8 apresenta os dados de temperatura e umidade registrados nas quatro medições:

Tabela 4.8: Temperatura e umidade do Ar. Períodos com Telha de Fibrocimento.

Variáveis	Medições (períodos de 2 horas)			
	E	F	G	H
Temperatura Máxima (°C)	21,5	24,0	19,5	23
Temperatura Média (°C)	21,0	23,5	19,4	22,4
Temperatura Mínima (°C)	20,0	22,5	19,0	21,5
Umidade Relativa Máxima (%)	43,0	34,0	37,0	38,0
Umidade Relativa Mínima (%)	41,0	32,0	36,0	34,0
Médias de $\Delta$ PSI	8,0	10,0	8,3	9,1
Precipitação Pluviométrica (mm)	0	0	0	0

A Figura 4.14 ilustra as temperaturas superficiais nos períodos de E até H:



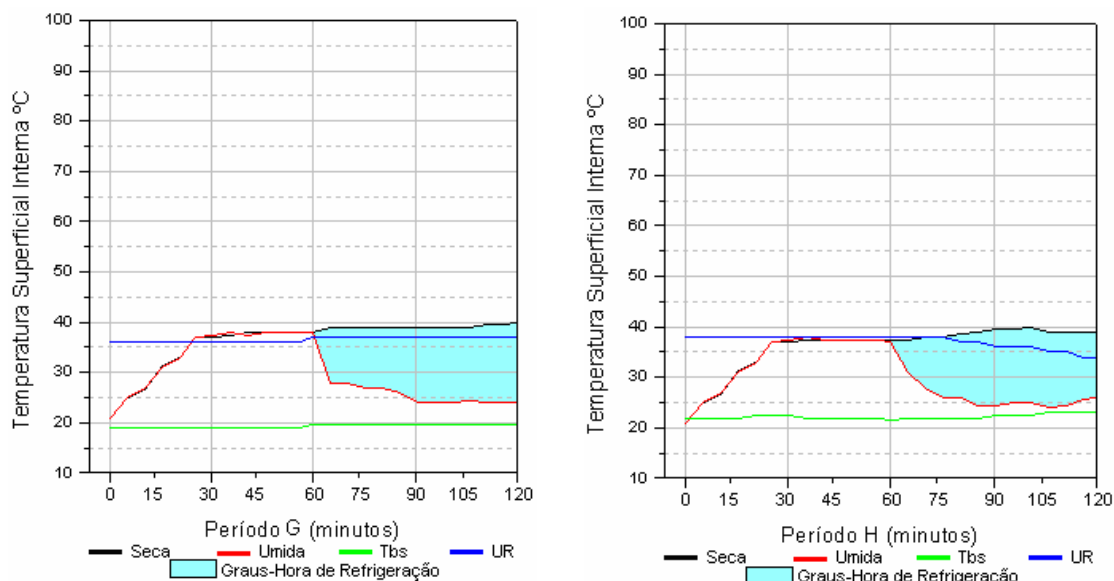


Figura 4.14: Temperaturas Superficiais, Tbs e UR nos períodos de A até D. Telha de Barro.

A Tabela 4.9 mostra as médias horárias de 4 medições. Para TBS média de 21.57 °C e  $\Delta$ PSI média de 8.86 °C, a diferença média entre a temperatura superficial interna da telha seca e a da telha úmida foi de 10.71 °C. Vale aqui o mesmo comentário sobre as telhas de barro, sobre a atipicidade climática do período monitorado.

Tabela 4.9: Médias Horárias (°C) – Telha de Fibrocimento.

Período	TBS	TSS	TSU	$\Delta$ TS	$\Delta$ PSI
E	21,0	39,73	32,35	7,38	7,98
F	23,5	41,3	30,57	10,73	10,03
G	19,4	39,07	26,34	12,73	8,28
H	22,38	38,7	26,69	12,0	9,13
<b>Médias</b>	<b>21,57</b>	<b>39,70</b>	<b>28,98</b>	<b>10,71</b>	<b>8,86</b>

Sendo:

TSS: Temp. superficial interna da telha seca

TSU: Temp. superficial interna da telha úmida

$\Delta$ TS = TSS - TSU

### Resfriamento no Fibrocimento

Procurou-se também no caso do fibrocimento identificar os fatores de maior influência no processo de resfriamento da telha umidificada.

Adotando-se a diferença entre as temperaturas superficiais internas ( $\Delta$ TS) como indicador, a

$$\square \Delta \text{TS} = 28,2 + 0,92\Delta \text{PSI} - 0,87\text{TSU}$$

**Equação 4.2** foi obtida por análise de

regressão linear múltipla para as telhas de fibrocimento, com coeficiente de correlação de 0.94 e desvio padrão de 1.36 (Figura 4.15).

$$\Delta \text{TS} = 28,2 + 0,92\Delta \text{PSI} - 0,87\text{TSU}$$

Equação 4.2

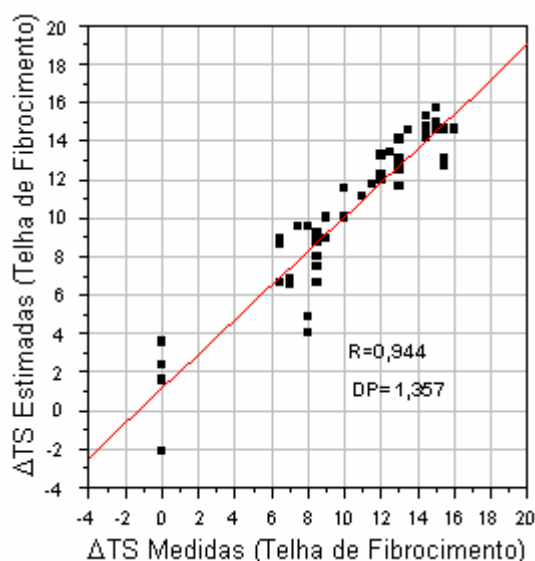


Figura 4.15:  $\Delta$ TS medidas e estimadas pela Equação 4.2. Telha de Fibrocimento.

### 4.2.3 Comparativo entre a Telha de Barro e a de Fibrocimento

Os experimentos demonstraram diferenças entre os comportamentos dos dois tipos de telhas, barro e fibrocimento. As telhas cerâmicas atingiram temperaturas muito altas (cerca de 98°C), apresentando potencial de refrigeração maior que as de fibrocimento.

A diferença de temperatura entre a telha de barro seca e a úmida chegou a 36°C. No caso das telhas de fibrocimento, esta diferença ficou em torno de 15°C.

As análises de regressão apontaram relação de dependência entre o potencial de refrigeração evaporativa da superfície interna da telha, a temperatura superficial interna da telha úmida e a diferença psicrométrica. O coeficiente de correlação foi de 0.93 para a telha de barro e de 0.91 para a de fibrocimento.

Os experimentos demonstrados a seguir apresentam resultados diferentes quanto às temperaturas registradas. O Experimento em Campo utilizou o sol como fonte de calor e não apresentou diferenças tão altas entre a telha seca e a úmida.

### 4.3 Experimento em Campo

O Experimento em Campo foi realizado no campus da Universidade Federal de São Carlos, especificamente no jardim do edifício da Escola de Engenharia no período de verão, Dezembro de 2004 e Janeiro de 2005. Assim como no Experimento em Laboratório, utilizou-se dois tipos de telha: de barro e de fibrocimento.

Consta neste trabalho o monitoramento de seis dias relativos à telha de barro e seis dias relativos à telha de fibrocimento. O gotejamento de água foi efetuado em intervalos de dez minutos, durante seis horas. A cada 5 minutos foram medidas as temperaturas superficiais internas de ambas as telhas, bem como as temperaturas e umidades do ar.

Sobre uma bancada de madeira, apoiou-se as duas telhas em questão, sendo estas inclinadas em 30% (aproximadamente 22°). A bancada orientava-se ao Norte, sem que nenhuma barreira física impedisse a circulação do ar e a incidência de radiação solar direta, portanto, sujeita às variações de temperatura e umidade do ar. Com base nos dados obtidos, procurou-se identificar correlações entre as diferenças das temperaturas superficiais internas das telhas seca e úmida e os parâmetros psicrométricos registrados.

#### 4.3.1 Experimento em Campo com Telhas de Barro

A Tabela 4.10 foi obtida a partir de dados registrados na estação climatológica da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo e apresenta as médias dos valores observados entre as 10 e as 18 horas dos mesmos dias dos monitoramentos.

Tabela 4.10: Condições médias do tempo durante os monitoramentos (EESC – USP). Barro.

Variáveis	Dias (períodos de 8 horas)					
	I	J	K	L	M	N
Tbs (°C)	27,3	28,2	29,5	30,3	28,4	30,7
Umidade Relativa (%)	43,3	42,4	34,8	30,8	53,1	36,4
Iluminância (lux)	126	131	172	129	358	208
Vento (m/s)	0,98	1,05	1,05	0,83	1,72	1,32
Precipitação Pluviométrica (mm)	0	0	0	0	0	0

Os dados climáticos registrados nos monitoramentos confirmam o período quente e úmido, típico de verão de climas tropicais de altitude. A Tabela 4.11 apresenta os dados de temperatura e umidade registrados nas medições:

Tabela 4.11: Dados climáticos aferidos. Telha de Barro.

Variáveis	Dias (períodos de 8 horas)					
	I	J	K	L	M	N
Tbs Máxima (°C)	27,12	28,31	29,50	30,31	32,34	30,71
Tbs Média (°C)	26,11	27,67	28,26	29,85	30,86	29,63
Tbs Mínima (°C)	24,40	26,73	26,34	28,31	29,50	27,52
Umidade Relativa Máxima (%)	63,70	59,70	56,50	47,60	48,90	61,90
Umidade Relativa Mínima (%)	38,20	40,70	33,10	30,70	37,20	48,40
Iluminância (lux)	70875	70875	74786	73917	74786	74786
Velocidade Média de Vento (m/s)	0,18	0,18	0,20	0,20	0,20	0,20
Médias de $\Delta$ PSI	6,68	7,72	9,40	10,80	9,80	7,34
Precipitação Pluviométrica (mm)	0	0	0	0	0	0

Os experimentos em campo demonstraram que, sob as condições psicrométricas, de vento e de radiação indicadas, a evaporação reduziu a temperatura interna das telhas de barro em até 18,7 °C, conforme as Figuras 4.16 a 4.21:

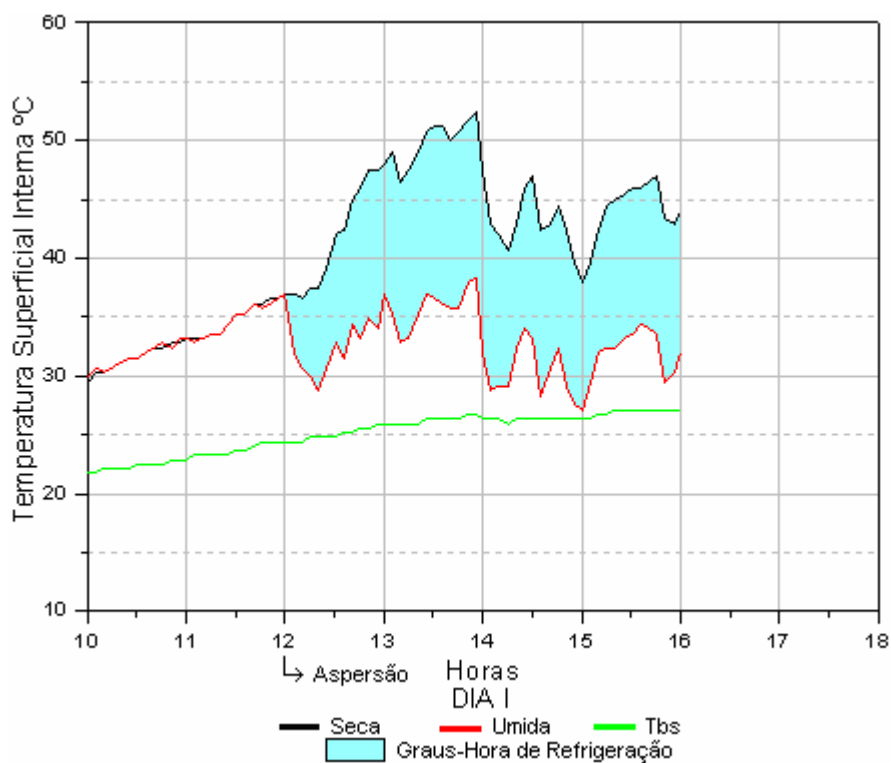


Figura 4.16: Superficiais e Tbs no Dia I. Telha de Barro.

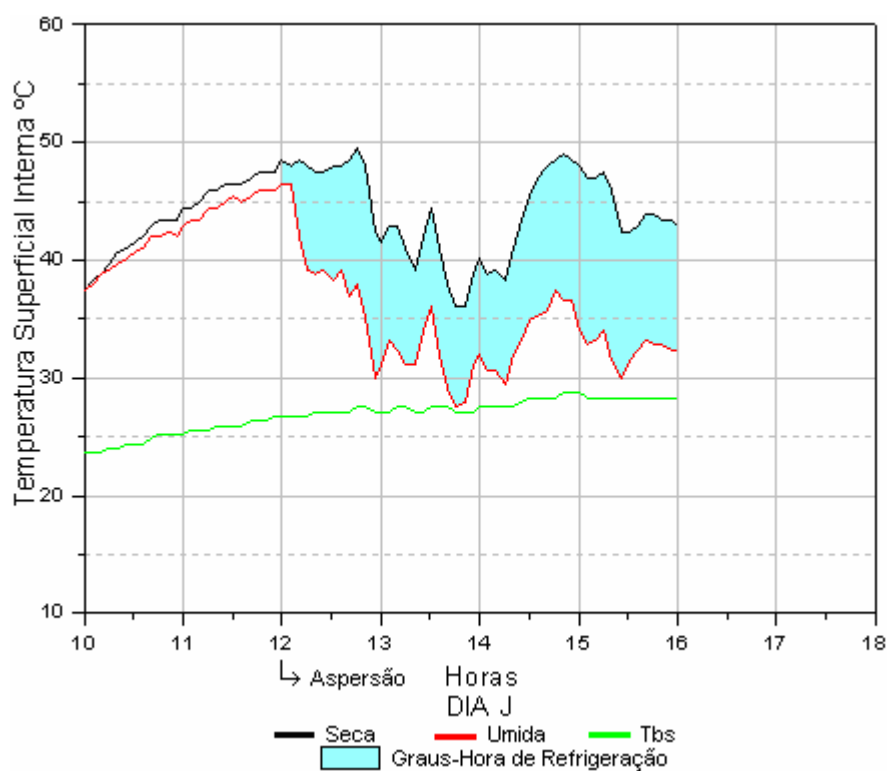


Figura 4.17: Superficiais e Tbs no Dia J. Telha de Barro.



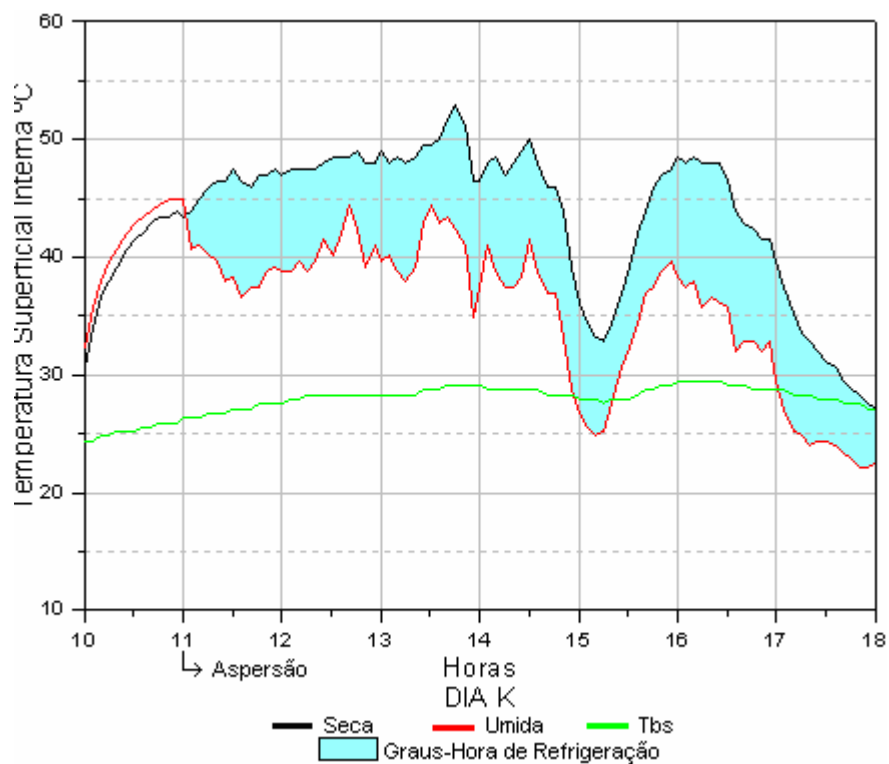


Figura 4.18: Superficiais e Tbs no Dia K. Telha de Barro.

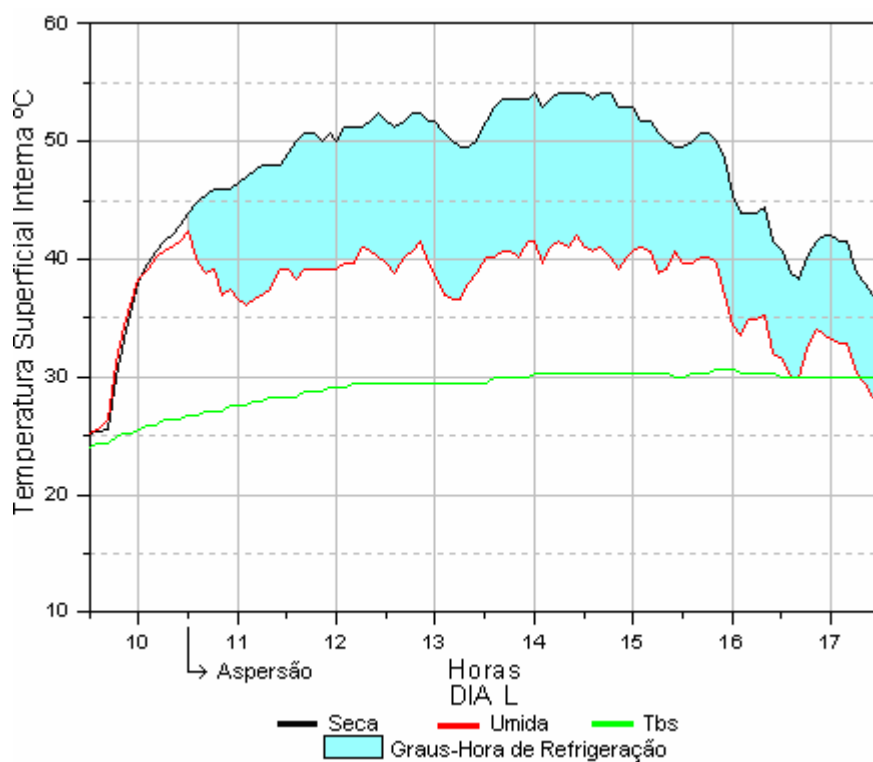


Figura 4.19: Superficiais e Tbs no Dia L. Telha de Barro.

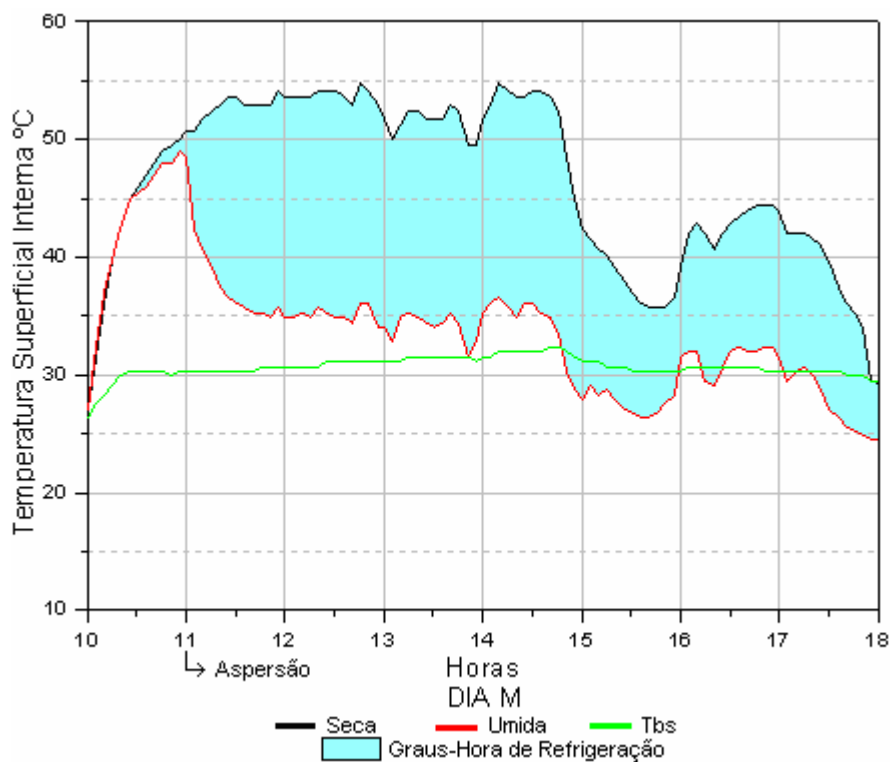


Figura 4.20: Superficiais e Tbs no Dia M. Telha de Barro.

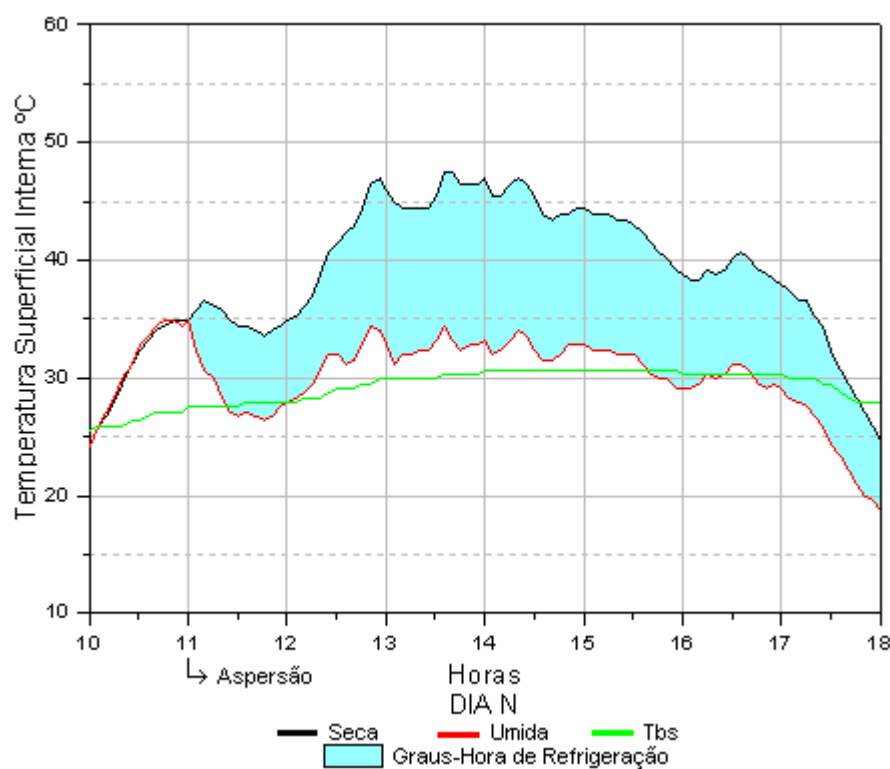


Figura 4.21: Superficiais e Tbs no Dia N. Telha de Barro.

As médias dos 6 valores medidos ao longo de cada meia hora indicaram diferenças significativas entre as temperaturas superficiais internas das duas telhas, conforme a Tabela 4.12.

Tabela 4.12: Máximas Diferenças Superficiais -  $\Delta TS$  (médias de cada meia hora) ( $^{\circ}C$ ). Barro.

dia	hora	TBS	$\Delta PSI$	TSS	TSU	$\Delta TS$
I	13:30	26,02	6,73	51,23	36,72	<b>14,51</b>
J	15:30	28,31	8,96	46,26	32,56	<b>13,70</b>
K	15:00	29,50	10,72	48,14	37,01	<b>11,13</b>
L	11:30	29,50	10,08	51,89	40,06	<b>11,83</b>
M	11:30	30,51	9,51	53,74	35,07	<b>18,67</b>
N	12:30	30,10	7,52	46,58	33,11	<b>13,47</b>

Onde:

TBS = Temperatura de Bulbo Seco

$\Delta PSI$  = TBS – TBU (diferença psicrométrica)

TSS = Temperatura superficial interna da telha seca

TSU = Temperatura superficial interna da telha úmida

$\Delta TS$  = TSS - TSU

### Resfriamento na Telha de Barro.

Procurou-se identificar os fatores de maior influência no processo de resfriamento da telha umidificada. Aferiu-se a cada 30 minutos os dados de velocidade do vento e radiação solar e aplicou-se à Equação 4.3.

Adotando-se a diferença entre as temperaturas superficiais internas ( $\Delta TS$ ) como indicador deste resfriamento, a análise de regressão linear múltipla indicou que  $\Delta TS$  pode ser estimada em função de indicadores climáticos, psicrométricos, de vento, radiação solar e de temperaturas superficiais (Equação 4.3), sendo estas últimas dependentes da absorvância da superfície.

$$\Delta TS = - 2,33 + 0,06TSS + 1,30\Delta PSI + 2,91Ven \quad \text{Equação 4.3}$$

Onde:

$\Delta TS$  = TSS – TSU

TSS = Temperatura Superficial da Telha Seca ( $^{\circ}C$ )

TSU = Temperatura Superficial da Telha Úmida ( $^{\circ}C$ )

$\Delta PSI$  = Diferença Psicrométrica ( $^{\circ}C$ )

Ven = Velocidade do Vento (m/s)

A Equação 4.3 confirma conceitos da literatura especializada, pois o potencial de refrigeração dos sistemas evaporativos depende das condições psicrométricas ( $\Delta PSI$ ), mas também das temperaturas da superfície do material (TSS), além de fatores climáticos como o vento e a radiação solar e permite comparar as relações entre  $\Delta TS$  medidas e estimadas, com coeficiente de correlação (R) de 0,79 e desvio padrão (DP) de 1,25, conforme a Figura 4.22.

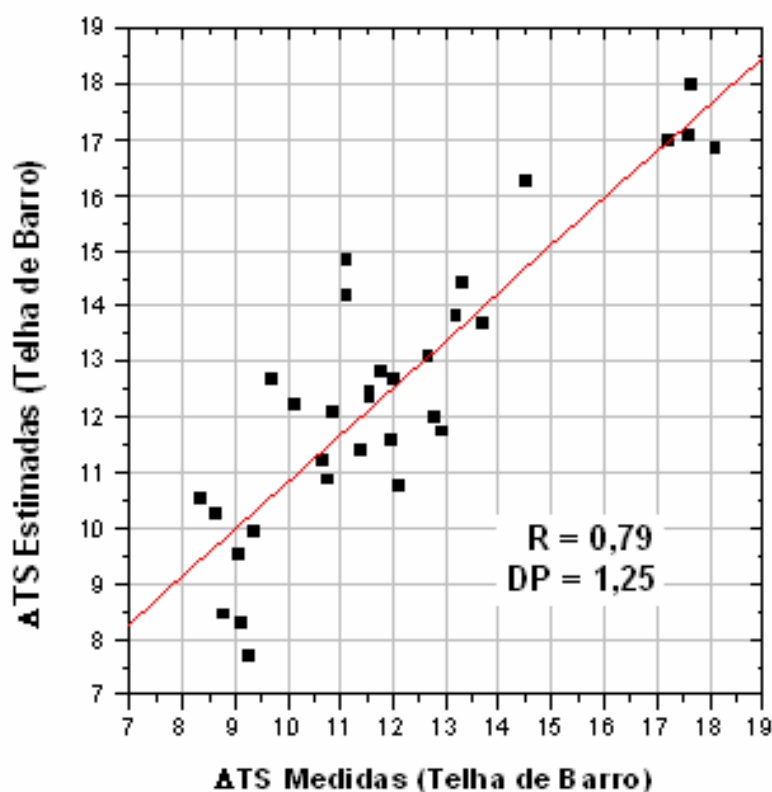


Figura 4.22:  $\Delta TS$  medidas e estimadas pela Equação 4.3. Telha de Barro.

As primeiras análises de regressão indicaram coeficiente de 0,61 e desvio padrão de 1,4, valor que não confirma a hipótese de correlação entre as variáveis. Deu-se prosseguimento à investigação e, em função da porosidade da cerâmica, supôs-se que na primeira hora de gotejamento a telha absorvia água, dificultando a análise do fenômeno evaporativo. Com isso, foi verificado que os pontos mais dispersos coincidiam com os da primeira hora de monitoramento de cada dia. Portanto, os resultados da análise de regressão aqui apresentados não consideram os dados da primeira hora de gotejamento nos seis dias monitorados.

#### 4.3.2 Experimento em Campo com Telhas de Fibrocimento

A Tabela 4.13 foi obtida a partir de dados registrados na estação climatológica da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo e apresenta as médias dos valores observados nos mesmos dias dos monitoramentos.

Tabela 4.13: Condições médias do tempo nos monitoramentos (EESC – USP). Fibrocimento.

Variáveis	Dias (períodos de 8 horas)					
	O	P	Q	R	S	T
Tbs (°C)	24,95	22,91	25,61	22,79	21,80	21,86
Umidade Relativa (%)	46,20	73,52	66,84	84,56	57,90	57,90
Iluminância (lux)	0,12	0,09	0,12	0,14	0,10	0,11
Vento (m/s)	0,46	0,76	0,63	0,31	0,78	0,57
Precipitação Pluviométrica (mm)	0	69	39	185	0	0

Os dados climáticos registrados nos monitoramentos confirmam o período quente e úmido, típico de verão de climas tropicais de altitude. A Tabela 4.14 apresenta os dados de temperatura e umidade registrados nas medições:

Tabela 4.14: Dados climáticos aferidos. Telha de Fibrocimento.

Variáveis	Dias (períodos de 8 horas)					
	O	P	Q	R	S	T
Tbs Máxima (°C)	29,9	30,31	33,17	27,52	34,01	33,17
Tbs Média (°C)	28,63	28,8	31,28	25,8	29,69	30,06
Tbs Mínima (°C)	25,95	26,73	29,1	23,24	25,56	26,73
Umidade Relativa Máxima (%)	47,4	68,3	64,1	91,7	50,8	49,1
Umidade Relativa Mínima (%)	36,6	55	47,7	66,6	25,1	32,4
Irradiação Solar Média (lux)	62443	46838	57714	56179	57714	63857
Velocidade Média de Vento (m/s)	0,32	0,52	0,16	0,12	0,16	0,16
Médias de $\Delta$ PSI	13,68	5,95	7,09	3,02	11,7	10,71
Precipitação Pluviométrica (mm)	0	0	0	0	0	0

Os experimentos em campo demonstraram que, sob as condições psicrométricas de vento e de radiação indicadas, a evaporação reduziu a temperatura interna das telhas de fibrocimento em até 16,99°C, conforme as Figuras 4.23 a 4.28:

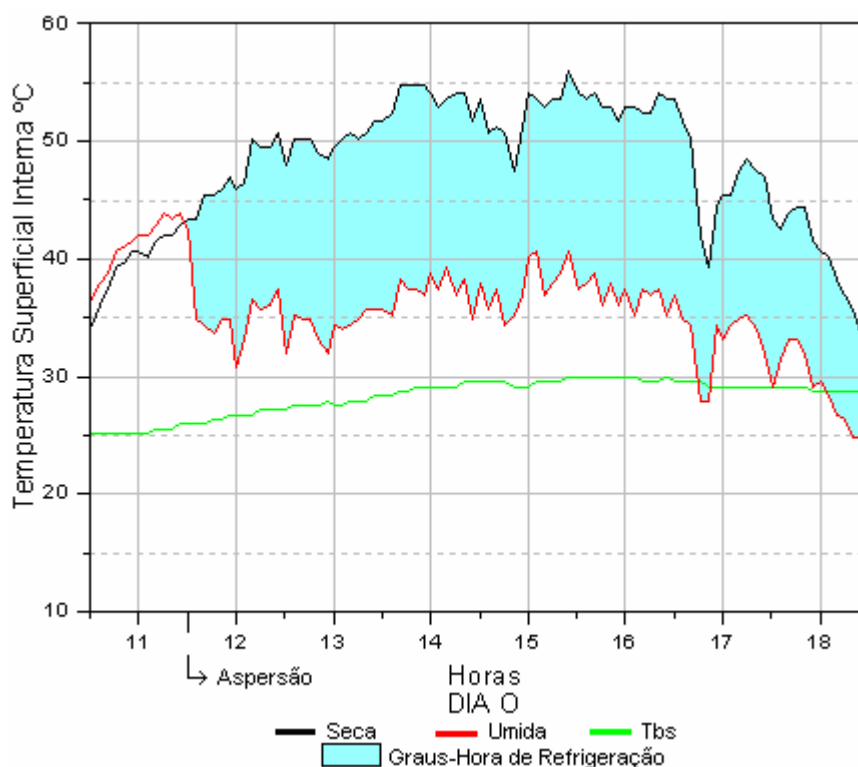


Figura 4.23: Superficiais e Tbs no Dia O. Telha de Fibrocimento.

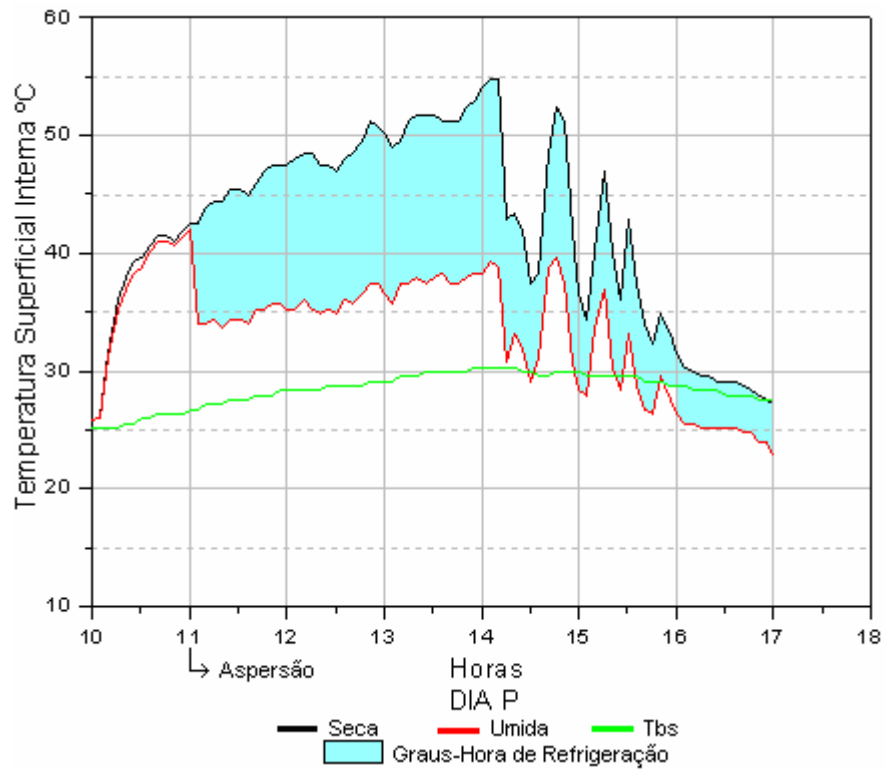


Figura 4.24: Superficiais e Tbs no Dia P. Telha de Fibrocimento.

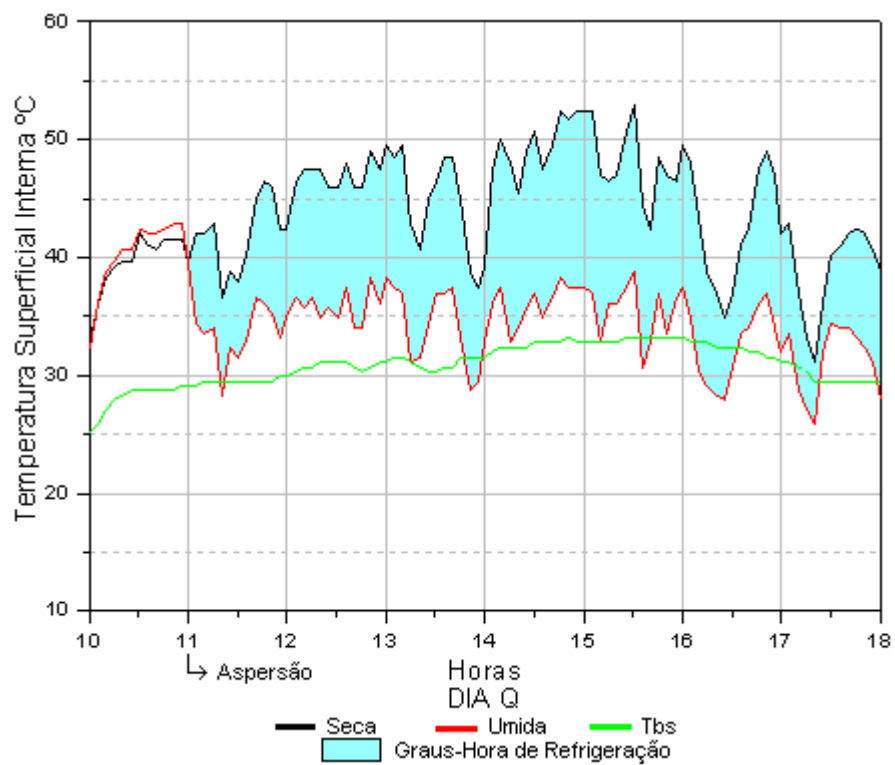


Figura 4.25: Superficiais e Tbs no Dia Q. Telha de Fibrocimento.

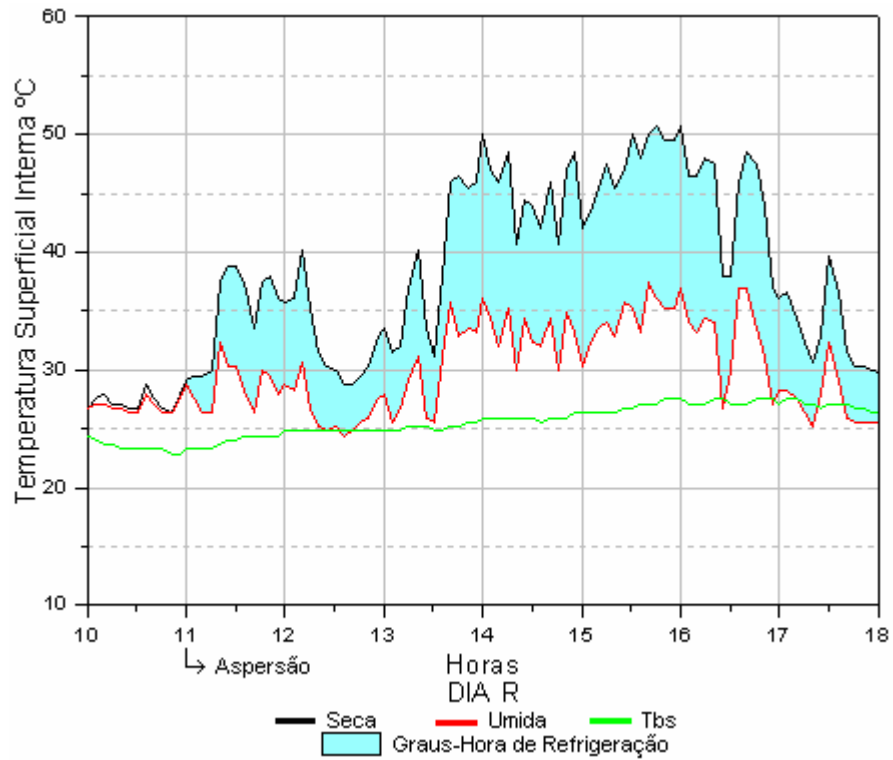


Figura 4.26: Superficiais e Tbs no Dia R. Telha de Fibrocimento.

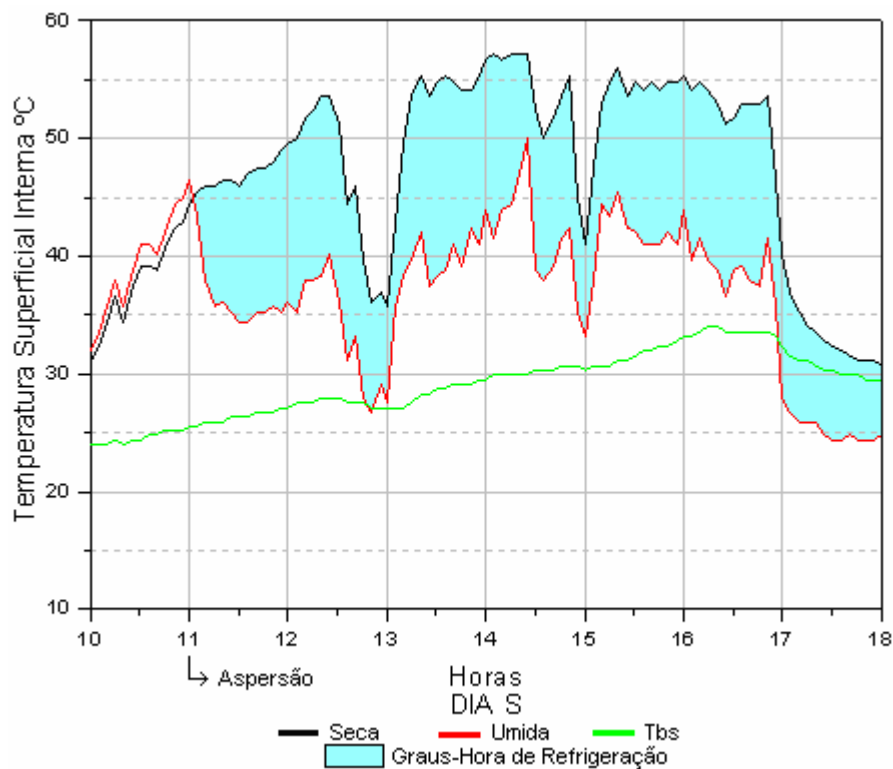


Figura 4.27: Superficiais e Tbs no Dia S. Telha de Fibrocimento.

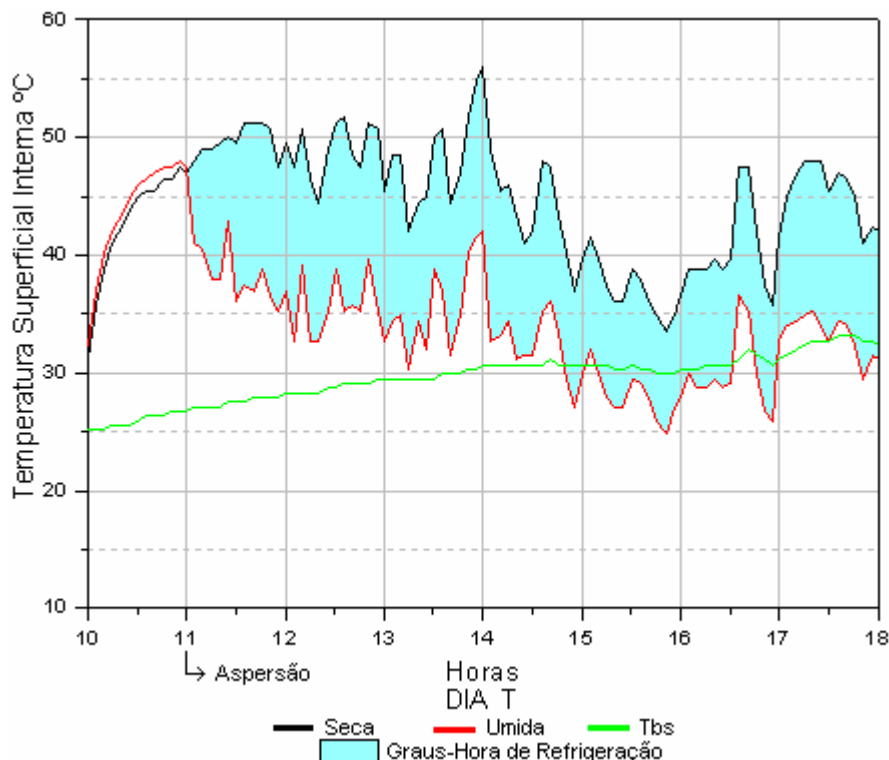


Figura 4.28: Superficiais e Tbs no Dia T. Telha de Fibrocimento.

As médias dos 6 valores medidos ao longo de cada meia hora indicaram diferenças significativas entre as temperaturas superficiais internas das duas telhas, conforme a Tabela 4.15.

Tabela 4.15: Máximas Diferenças Superficiais -  $\Delta TS$  (médias de cada meia hora) (°C).  
Fibrocimento

dia	hora	TBS	$\Delta PSI$	TSS	TSU	$\Delta TS$
O	14:00	28,60	14,98	53,85	36,86	<b>16,99</b>
P	14:00	29,90	6,40	51,80	37,90	<b>13,90</b>
Q	15:00	32,76	7,95	50,70	36,94	<b>13,76</b>
R	16:00	27,06	4,04	49,66	35,43	<b>14,24</b>
S	12:30	27,58	9,96	51,82	37,60	<b>14,21</b>
T	13:00	29,10	10,30	50,14	36,66	<b>13,48</b>

Onde:

TBS = Temperatura de Bulbo Seco

$\Delta PSI$  = TBS – TBU (diferença psicrométrica)

TSS = Temperatura superficial interna da telha seca

TSU = Temperatura superficial interna da telha úmida

$\Delta TS$  = TSS - TSU

### Resfriamento na Telha de Fibrocimento.

Assim como no caso da telha de barro, procurou-se identificar os fatores de maior influência no processo de resfriamento da telha umidificada. Aferiu-se a cada 30 minutos os dados de velocidade do vento e radiação solar e aplicou-se à Equação 4.4, mesmo procedimento do item 4.3.1.



Adotando-se a diferença entre as temperaturas superficiais internas ( $\Delta TS$ ) como indicador deste resfriamento, a análise de regressão linear múltipla indicou que neste caso,  $\Delta TS$  pode ser estimada em função da diferença psicrométrica e da temperatura superficial da telha seca (Equação 4.4), sendo esta dependente da absorvância da superfície:

$$\Delta TS = -10,06 + 0,13\Delta PSI + 0,46TSS \quad \text{Equação 4.4}$$

Onde:

$\Delta TS = TSS - TSU$

TSS = Temperatura Superficial da Telha Seca ( $^{\circ}C$ )

TSU = Temperatura Superficial da Telha Úmida ( $^{\circ}C$ )

$\Delta PSI$  = Diferença Psicrométrica ( $^{\circ}C$ )

A Equação 4.4 também confirma conceitos da literatura especializada, pois o potencial de refrigeração dos sistemas evaporativos depende das condições psicrométricas ( $\Delta PSI$ ), mas também das temperaturas da superfície do material (TSS), além de fatores climáticos como o vento e a radiação solar e permite comparar as relações entre  $\Delta TS$  medidas e estimadas, com coeficiente de correlação (R) de 0,95 e desvio padrão (DP) de 1,02, conforme a Figura 4.29:

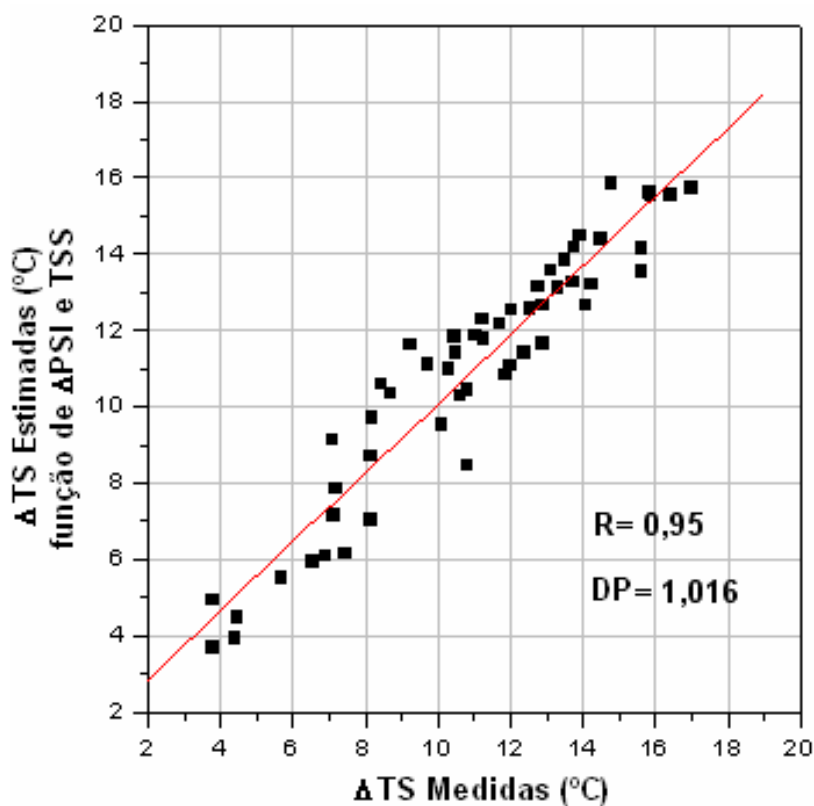


Figura 4.29:  $\Delta TS$  medidas e estimadas pela Equação 4.4. Telha de Fibrocimento.

### 4.3.3 Comparativo entre as Telhas de Barro e de Fibrocimento

Efetou-se um comparativo entre o desempenho dos dois tipos de telha por meio dos dados médios dos períodos de medição. As Tabela 4.16 e Tabela 4.17 expõem lado a lado os dados climáticos dos monitoramentos com telha de barro e fibrocimento e demonstram que os dados monitorados se apresentaram similares:

Tabela 4.16: Comparativo dos dados climáticos observados. Experimento em Campo.

Variáveis	Dias (períodos de 6 a 8 horas)											
	Telha de Barro						Telha de Fibrocimento					
	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
Tbs Máxima (°C)	27,12	28,31	29,50	30,31	32,34	30,71	29,9	30,31	33,17	27,52	34,01	33,17
Tbs Média (°C)	26,11	27,67	28,26	29,85	30,86	29,63	28,63	28,8	31,28	25,8	29,69	30,06
Tbs Mínima (°C)	24,40	26,73	26,34	28,31	29,50	27,52	25,95	26,73	29,1	23,24	25,56	26,73
UR Máxima (%)	63,70	59,70	56,50	47,60	48,90	61,90	47,4	68,3	64,1	91,7	50,8	49,1
UR Mínima (%)	38,20	40,70	33,10	30,70	37,20	48,40	36,6	55	47,7	66,6	25,1	32,4
Médias Irrad. (lux)	70875	70875	74786	73917	74786	74786	62443	46838	57714	56179	57714	63857
Médias Vento. (m/s)	0,18	0,18	0,20	0,20	0,20	0,20	0,32	0,52	0,16	0,12	0,16	0,16
Médias $\Delta$ PSI (°C)	6,68	7,72	9,40	10,80	9,80	7,34	13,68	5,95	7,09	3,02	11,7	10,71
Chuvas (mm)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tabela 4.17: Comparativo das Máximas Diferenças Superficiais (°C). Experimento em Campo.

dia	Telha de Barro						Telha de Fibrocimento					
	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
hora	13:30	15:30	15:00	11:30	11:30	12:30	14:00	14:00	15:00	16:00	12:30	13:00
Tbs	26,0	28,3	29,5	29,5	30,51	30,1	28,6	29,9	32,8	27,1	27,6	29,1
$\Delta$ PSI	6,7	9,0	10,7	10,1	9,51	7,5	15,0	6,4	8,0	4,0	10,0	10,3
TSS	51,2	46,3	48,1	51,9	53,74	46,6	53,9	51,8	50,7	49,7	51,8	50,1
TSU	36,7	32,6	37,0	40,1	35,07	33,1	36,9	37,9	36,9	35,4	37,6	36,7
$\Delta$ TS	14,5	13,7	11,1	11,8	18,67	13,5	17,0	13,9	13,8	14,2	14,2	13,5

Onde:

$\Delta$ PSI = TBS – TBU (diferença psicrométrica)

TSS = Temperatura superficial interna da telha seca

TSU = Temperatura superficial interna da telha úmida

$\Delta$ TS = TSS - TSU

Os cálculos demonstraram que o monitoramento com a telha de barro foi feito em dias mais secos com temperaturas mais constantes (Figura 4.30) e (Figura 4.31). A curva calculada com a média dos valores da telha de barro úmida aparece com valores mais baixos que a de fibrocimento no final do período (Figura 4.32) podendo estar relacionado à diferença de umidade. No caso do fibrocimento, os dados de vento se apresentam mais altos e os de irradiação solar mais baixos, o que, teoricamente deveria diminuir as temperaturas superficiais das telhas seca e úmida.

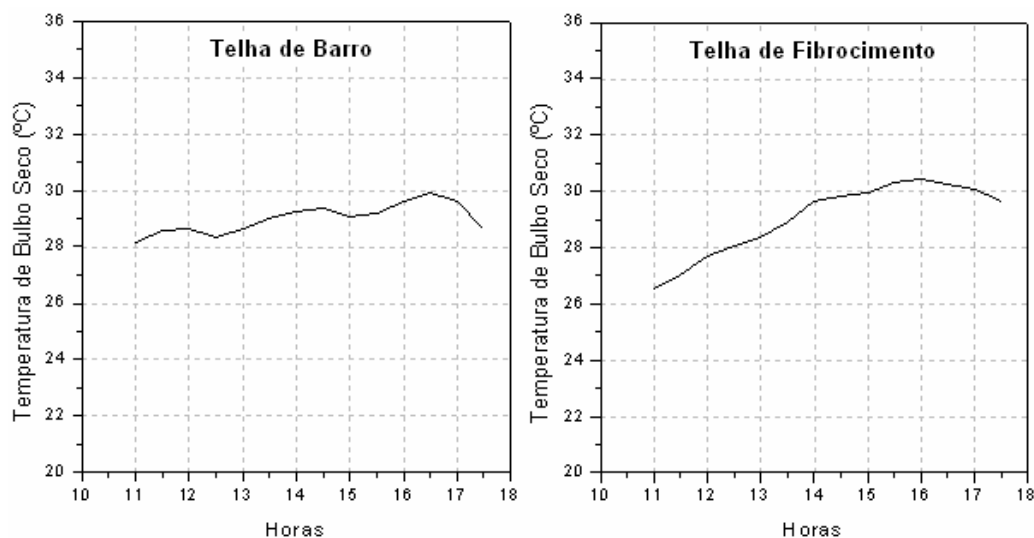


Figura 4.30: Tbs média (°C) dos dias monitorados. Telhas de Barro e Fibrocimento.

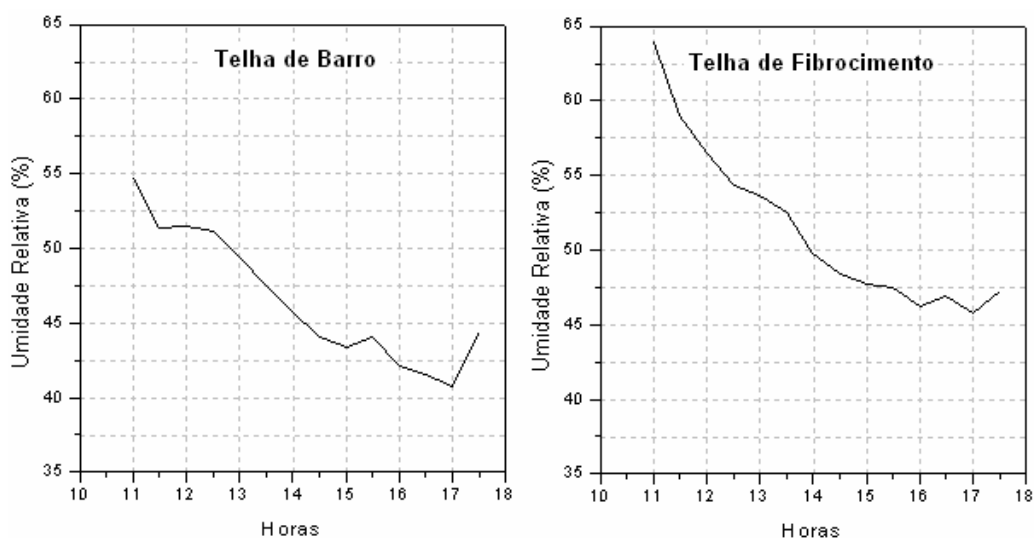


Figura 4.31: Umidade Relativa (%) dos dias monitorados. Barro e Fibrocimento.

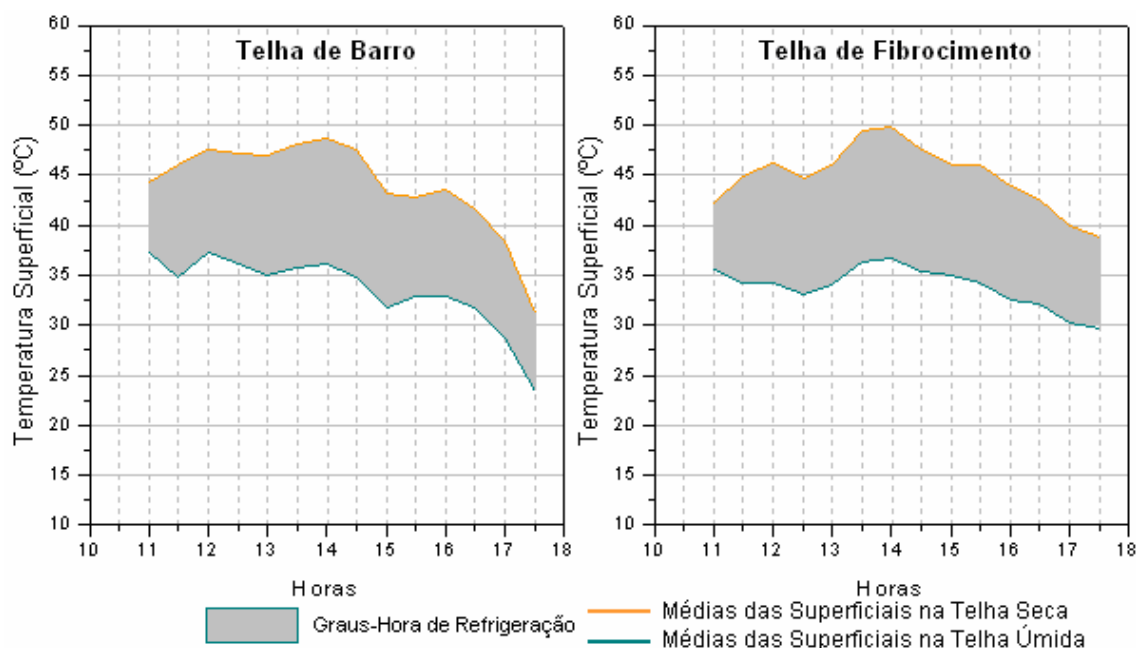


Figura 4.32: Médias das Temperaturas Superficiais. Barro e Fibrocimento.

O comportamento das telhas de barro e de fibrocimento, no caso do experimento em campo, se apresentou similar. Enquanto a máxima entre as telhas de barro ficou em torno de 18°C, a de fibrocimento se apresentou em torno de 17°C.

O experimento em campo demonstrou que o comportamento dos dois tipos de telhas, barro e fibrocimento, não é tão distinto como os apresentados no experimento em laboratório. Enquanto no laboratório, a diferença entre as temperaturas superficiais da telha de barro, seca e úmida, chegou a 36°C, no experimento em campo essa diferença ficou em torno de 18°C. No caso da telha de fibrocimento, o experimento em laboratório apresentou diferenças em torno de 15°C entre a telha seca e a úmida. Já o experimento em campo apresentou diferenças em torno de 17°C.

No monitoramento em campo, a telha de fibrocimento aparentou ser mais sensível a falta de água no processo de refrigeração evaporativa, dado as oscilações das curvas da telha úmida. Provavelmente, este fato se justifique pelo fibrocimento possuir menor permeabilidade à água se comparado à cerâmica.

Apesar dos resultados de redução de temperatura se apresentarem de forma similar nos casos da telha de barro e de fibrocimento, as análises de regressão múltipla apresentaram comportamentos distintos. No caso da telha de barro, as melhores correlações encontradas demonstraram relação de dependência entre as reduções de temperatura superficial, as diferenças psicrométricas, a temperatura superficial da telha seca e os fatores climáticos como o vento e a radiação solar direta. No caso da telha de fibrocimento, as melhores correlações encontradas demonstraram que as reduções de temperatura superficial dependem da diferença psicrométrica e da temperatura superficial da telha seca somente, e não mais dos fatores climáticos de vento e radiação solar direta.

## 5 Conclusões

---

O capítulo 5 apresenta a parte conclusiva das experiências discutidas no capítulo anterior, levando-se em conta o aprendizado teórico descrito na revisão bibliográfica (Capítulo 2). Sugere-se ainda temas para pesquisas futuras.

### 5.1 *Sobre o Experimento Piloto*

O Experimento Piloto demonstrou que a presença de película de água sobre a cobertura plana diminui as amplitudes térmicas, tanto superficiais quanto do ambiente, se comparado com uma laje plana de concreto. Para o caso de verão em Araraquara, a redução das amplitudes térmicas do ambiente é satisfatória ao clima tropical de altitude. A cidade apresenta umidades muito baixas em determinados períodos.

A laje com película de água sobre placa de concreto apresentou temperaturas superficiais e do ar mais altas que as da laje comum no período da tarde, horário crítico, em que a sala é frequentemente utilizada e se constata as temperaturas mais altas do dia. O fato pode ser explicado pela alta inércia térmica da água, que absorve o calor proveniente da radiação solar direta e o transmite ao ambiente interno por condução e convecção com atraso térmico.

Concluiu-se que no caso monitorado, a película de água sobre a placa de concreto não foi satisfatória ao conforto térmico se comparada à laje comum. No período de maior uso do cômodo a temperatura superficial e do ar se apresentaram ligeiramente mais elevadas.

### 5.2 *Sobre o Experimento em Laboratório*

Os experimentos em bancada demonstraram que, sob as condições psicrométricas indicadas, a evaporação reduziu a temperatura superficial interna das telhas de fibrocimento em até 15 °C, e até 36 °C no caso das telhas de barro.

As análises de regressão apontaram relação de dependência entre o potencial de refrigeração evaporativa da superfície interna da telha, a temperatura superficial interna da telha úmida e a diferença psicrométrica. O coeficiente de correlação foi de 0.93 para a telha de barro e de 0.91 para a de fibrocimento.

Apesar de comprovado o efeito refrigerativo da evaporação da água sobre a superfície interna das telhas de barro e de fibrocimento, o monitoramento com telha de barro apresentou temperaturas internas extremamente altas, diferente do caso da telha de fibrocimento. A princípio, acreditava-se que a diferença das absorções dos materiais em questão era responsável pelas consideráveis reduções de temperatura na telha de barro, diferente do que acontecia com o fibrocimento. O que se percebeu com o experimento em campo foi que as reduções nas temperaturas superficiais dos dois tipos de telhas são similares.

Concluiu-se que o gotejamento de água sobre a face externa de telhas de barro e de fibrocimento em laboratório reduziu significativamente as temperaturas superficiais internas das mesmas. Porém, no caso, o método de utilização dos refletores no laboratório não permitiu um comparativo seguro com as situações reais, tendo o sol como fonte de calor. Percebeu-se com o experimento em campo que as reduções de temperaturas superficiais na telha de barro e na de fibrocimento não ultrapassaram 20°C.

### **5.3 Sobre o Experimento em Campo**

Os experimentos em bancada demonstraram que, sob as condições psicrométricas, de vento e de radiação solar indicadas, a evaporação reduziu a temperatura superficial interna em até 18,7 °C na telha de barro e até 17,0°C na telha de fibrocimento.

As análises de regressão múltipla apontaram relação de dependência entre o potencial de refrigeração evaporativa da superfície interna da telha, a temperatura superficial interna da telha seca e a diferença psicrométrica, além das condições de velocidade do vento e de radiação solar direta na telha de barro. Os coeficientes de correlação encontrados foram de 0,79 e desvio padrão de 1,25 no caso das telhas de barro e 0,95 e desvio padrão de 1,02 no caso das telhas de fibrocimento.

Concluiu-se que o gotejamento de água sobre superfícies externas de telhas de barro e de fibrocimento reduz a temperatura superficial interna das mesmas por meio da refrigeração evaporativa, sendo um potencial método de resfriamento passivo de telhados de barro e de fibrocimento na região de São Carlos-SP.

### **5.3 Sugestões para Estudos Futuros**

Sugere-se os seguintes temas de estudo da refrigeração evaporativa sobre coberturas:

- Refrigeração Evaporativa sobre coberturas. Experimento em residência unifamiliar.
- O impacto da absorvância de telhas cerâmicas no desempenho de refrigeração evaporativa sobre coberturas desse material.
- Refrigeração Evaporativa sobre coberturas metálicas. Experimento em edificações e bancada de testes.
- Desempenho da refrigeração evaporativa como apoio a sistemas de condicionamento do ar.

## 6 Referências

---

### *Referências Bibliográficas*

- ALLEN, R. G. et al. 1998. Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements. Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO. Rome. Disponível em: <http://www.fao.org/docrep/X0490e00.htm#contents>>. Acesso em 03 de Dezembro de 2004.
- AL-TURKI A. M.; ZAKI G. M. Energy saving through intermittent evaporative roof cooling. *Energy and Buildings* 1991; 17: 35-42.
- ARMELIN, Hugo S. CHERRY, Nigel. 2004. “Avaliação do uso e desempenho de barreiras de radiação térmica na construção civil”. In: e-Mat – Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil. Vol. 1, n.1, p. 79-82. Maio. ANTAC.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1980. “Instalações centrais de ar-condicionado para conforto: parâmetros básicos de projeto” – procedimento – NBR 6401, Riode Janeiro.
- BADRAN, Ali A. Performance of cool towers under various climates in Jordan. *Energy and Buildings* 2003; 35: 1031-1035.
- BOWMAN N. et al. Application of Passive Down-Draught Evaporative Cooling (PDEC) to non-domestic buildings. *Renewable Energy* 1997; 10: 191-196.
- CARNEIRO, C.M. 1988. “O Papel do projeto Arquitetônico na racionalização do consumo de energia elétrica na edificação”. In: Tecnologia de Edificações. São Paulo, Pini / IPT.
- CAVALCANTI, José Roberto de Sousa. PRADO, R.T.A. 2001. “Estudo Experimental Comparativo entre Resfriamento Evaporativo e Radiativo em Ambientes Cobertos com Telhas de Fibrocimento em Região de Clima Quente e Úmido”. São Paulo: EPUSP.



- CHANDRA S. ; KAUSHIK S. C. ; BANSAL P. K. Thermal Performance of a non – air – conditioned Building for Passive Solar Air-conditioning: Evaluation of Roof Cooling Systems. *Energy and Buildings* 1985; 8: 51-69.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Clima e hidrologia. Disponível em: <https://www.cppse.embrapa.br/>. Acesso em: 24 out. 2004.
- FORD B.; PATEL N.; ZAVERI P.; HEWITT M.; Cooling Without Air Conditioning. *Renewable Energy*. 1998; 15: 177-182.
- GIVONI B.; Confort Climate Analysis and Building Design Guidelines. *Energy and Building*. 18(1), 11-23, 1992.
- GIVONI, B. “Experimental Studies on Passive Cooling at the Institute for Desert Research in Israel”. *Proc. Solar Energy Symposium*. Nice, France – pp.296-300.
- GIVONI, B. 1994. “Passive and Low Energy Cooling of Buildings”. Van Nostrand Reinhold. New York, USA. Pp 130-190.
- GONZÁLEZ, E. 1989. “Hacia una vivienda climatizada por medios pasivos”. Informe de Investigación. Fac. de Arq. Luz.
- GONZÁLEZ, E. 1997. “Técnicas de enfriamiento pasivo. Resultados experimentales en el clima cálido y húmedo de Maracaibo, Venezuela”. CIT, Información Tecnológica, vol. 8 N°5, pp. 99-103. La Serena, Chile.
- KOCA R. W.; HUGHES W. C.; Christianson L. L. Evaporative Cooling pads: test, procedure and evaluation. *Applied Engineering in Agriculture*. 1991; 7(A): 485-490.
- KRISHAN KANT; MULLICK S. C. Thermal comfort in a room with exposed roof using evaporative cooling in Delhi. *Building and Environment* 2003; 38: 185-193.
- LAMBERTS, R. 1983. “Desempenho Térmico de Coberturas leves com ático; Bancada de Testes e Modelo Matemático. Porto Alegre: UFRGS.
- LAMBERTS, R. 1991. “Influência do desempenho térmico de coberturas com atijo no conforto térmico de casas populares”. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído. Gramado, 1990. Anais. Porto Alegre: ANTAC.
- LEONG. 2001. “Cooling Barbers Point. Methods of In- direct Evaporative Cooling”. Hawaii: USA.

- LIAO, Chung-Min; CHIU, Kun Hung. Wind tunnel modeling the system performance of alternative evaporative cooling pads in Taiwan region. *Building and Environment*. 2002; 37: 177-187.
- MASCARÓ, J; MASCARÓ L. s.d. “Uso Racional de Energia em Edificações: Isolamento Térmico. São Paulo: Agência para Aplicação de Energia.
- MORAIS, Caroline Santana de. Desempenho térmico de coberturas vegetais em edificações na cidade de São Carlos-SP / Caroline Santana de Moraes. – São Carlos : UFSCar, 2004. 106 p.
- NAHAR N. M.; SHARMA P.; PUROHIT M. M. “Performance of different passive techniques for cooling of buildings in arid regions”. *Energy Conversion & Management*. (). P. Pergamon.
- NAHAR N. M.; SHARMA P.; PUROHIT M. M. “Studies on solar Passive Cooling techniques for arid áreas”. *Energy Conversion & Management*. 40 (1999). P. 89-95. Pergamon.
- ONMURA S. ; MATSUMOTO M. ; Hokoi S. Study on evaporative cooling effect of roof lawn gardens. *Energy and Buildings* 2001; 33: 653-666.
- QINGLIN Meng; WENBIN HU. Roof cooling effect with humid porous médium. *Energy and Buildings* 2005; 37: 1-9.
- RIVERO, Roberto. 1985. “Arquitetura e clima: acondicionamento térmico natural”. - Porto Alegre: D.C. Luzzatto Editores: Ed. da Universidade, UFRGS. 240p.
- RORIZ, M. Palestra sobre uso da Refrigeração Evaporativa em edificações. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – USP. São Carlos, SP. 2003.
- RORIZ, M. Potencial de Uso da Refrigeração Evaporativa no Estado de São Paulo. Seminário Internacional NUTAU 2000. Faculdade de Arquitetura e Urbanismo – USP. São Paulo, SP, 2000.
- SAFARZADETH H.; BAHADORI M. N.; Passive cooling effects of courtyards. *Building and Environment*. 2005; 40: 89-104.
- SMITH J. C. Roof Cooling Systes Offer Industry Big Savings. *Industrial Engineering* 1993; 25 (9): 36-37.
- SODHA M. S.; SAWHNEY R. L.; DESBMUKH M. K. Energy conservation in large air-conditioned buildings: use of evaporative roof cooling in hot and dry climates. *International Journal of energy resarch* 1989; 13: 179-192.

- SZOKOLAY, S.V. 1995. "Thermal design of Buildings". The Royal Australian Institute of Architects. Brisbane.
- TANG R.; ETZION Y. On thermal performance of na improved roof pond for cooling Buildings. *Building and Environment*. 2004; 39: 201-209.
- VOTTORINO F.; SATO N.M.N.; AKUTSU M. Desempenho térmico de isolantes refletivos e barreiras radiantes aplicados em coberturas. *Téchne*, São Paulo, n.75, p. 66-70, jun. 2003.
- WU, H. 1989. "Performance Monitoring of A Two Stage Evaporative Cooler". *ASHRAE transaction*, v.95, Pt.1, Chicago.
- ZHARA GHIABAKLOU. Thermal comfort prediction for a new passive cooling system. *Building and Environment*. 2003; 38: 883-891.