



REFRIGERAÇÃO EVAPORATIVA DE TELHADO CERÂMICO POR MEIO DE GOTEJAMENTO DE ÁGUA

Gustavo Rosas Nascimento (1); Mauricio Roriz (2)

(1) Arquiteto. Mestrando em Construção Civil. Universidade Federal de São Carlos, Departamento de Engenharia Civil, Programa de Pós-Graduação em Construção Civil. São Carlos, SP, Brasil.

Tel/Fax: 55 16 3324-1120.

e-mail: gufara@uol.com.br.

(2) Arquiteto. Docente do Programa de Pós-Graduação em Construção da Universidade Federal de São Carlos. São Carlos, SP, Brasil. Tel: 55 16 3361-1442.

e-mail: m.roriz@terra.com.br.

RESUMO

A evaporação de água sobre coberturas, retira calor das mesmas, refrigerando indiretamente o interior da edificação. Este artigo apresenta resultados de um estudo em que foram medidos os efeitos que essa evaporação provoca sobre as temperaturas superficiais internas de telhas de barro, sujeitas às variações climáticas como o vento e radiação solar. 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 18,67 °C na temperatura superficial interna da telha de barro.

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

ABSTRACT

Water evaporation can remove heat of roofs, cooling the interior of buildings indirectly. This paper presents results of a study measuring the effects that the evaporation provokes on the internal surface temperature of ceramic tiles. Using regression analyses, strong correlations were found among the falls observed in the internal surface temperatures of the tiles and the climatic conditions. The evaporation provoked reduction of until 18,67 °C in the ceramic roof.

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

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.

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. O objetivo do trabalho aqui relatado foi avaliar a redução que este efeito provoca na temperatura superficial interna de telhas de barro. O estudo foi realizado em São Carlos, cidade do interior do Estado de São Paulo, Brasil.

Embora de maneira empírica, os benefícios da evaporação da água para o conforto térmico ambiental já eram conhecidos por muitos povos da antiguidade, 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. Outros exemplos de sistemas de refrigeração evaporativa são também comuns na Espanha, Afeganistão, Irã e outros países cuja umidade do ar é baixa durante a maior parte do ano.

Pesquisas realizadas em zonas de clima quente e seco, como Negev, Israel (GIVONI, 1992); Arizona, Estados Unidos (GIVONI, 1992); e mesmo em clima quente e úmido, como o de Maracaibo, Venezuela (GONZÁLEZ, 1997), têm apresentado resultados muito satisfatórios, que encorajam a realização de testes para o clima semi-úmido da região central do Estado de São Paulo.

O experimento teve como objetivo avaliar a redução das temperaturas superficiais internas de telhas de barro por meio da evaporação da água. Para tanto, construiu-se uma bancada de testes para comparar o desempenho térmico de duas telhas idênticas; uma mantida seca e outra com gotejamento de água, sob as condições climáticas de São Carlos, SP, no mês de novembro de 2004.

1.1 Processo Físico da Refrigeração Evaporativa

O processo de refrigeração evaporativa consiste em retirar calor do ambiente por meio da evaporação da água. Para evaporar, a água necessita de calor, retirando-o do ambiente sob forma de calor latente armazenado no vapor.

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. A diferença entre a temperatura de bulbo seco (TBS) e a temperatura de bulbo úmido (TBU) é denominada Diferença Psicrométrica (Δ PSI), sendo o fator mais importante na eficiência de qualquer sistema de Refrigeração Evaporativa.

Sob condições adiabáticas¹, a evaporação da água diminui a temperatura do ar e eleva sua taxa de umidade², mantendo constante o total de energia (calor sensível + calor latente). Cada litro de água evaporado sob essas condições (Equação 1, GONZÁLES, 1997), absorve em torno de 666 W, 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%.

$$PE = \frac{1 \text{ kg} \times 2400 \text{ kJ/kg}}{3600 \text{ s}} = 666 \text{ W} \quad [\text{Eq. 1}]$$

Onde:

PE é o Potencial de Evaporação.

2400 kJ/kg é o calor latente de vaporização da água.

A taxa de evaporação (E_v) de uma superfície com água é dada pela Equação 2 (GONZÁLES, 2003):

$$E_v = 0,003 \cdot (PVS - PVA) \cdot (1 + 0,38V_{en}) \quad [\text{Eq. 2}]$$

Onde:

PVA é a Pressão de Vapor Atual (Pa)

PVS é Pressão de Vapor do Ar Saturado (Pa)

V_{en} é a Velocidade do Vento (m/s)

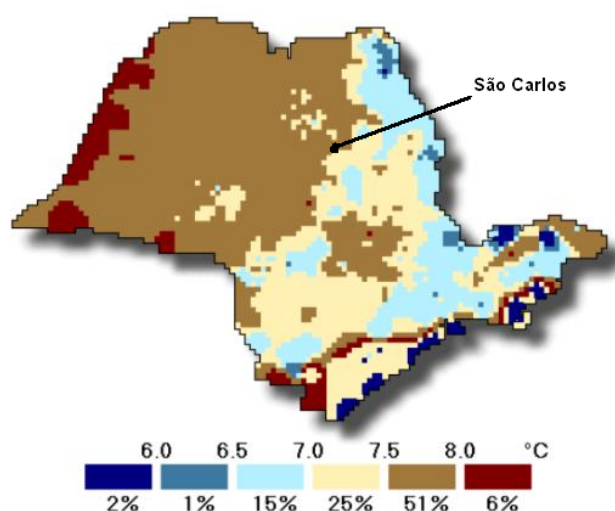
¹ Condições Adiabáticas: Situação hipotética sem trocas térmicas com elementos externos ao sistema.

² Taxa de Umidade: razão entre a massa de vapor d'água e a massa de ar seco contidos em uma amostra.

Refrigeração Evaporativa Indireta

Os processos de refrigeração evaporativa que não atuam diretamente sobre o ar dos ambientes internos, são denominados processos indiretos. Em alguns destes, antes de ser introduzido nos ambientes internos, o ar exterior perde calor por convecção com alguma superfície resfriada por evaporação. Em outros, o resfriamento evaporativo é provocado sobre superfícies externas da própria edificação, como é o caso enfocado no presente estudo. Uma diferença importante entre os sistemas diretos e indiretos de refrigeração evaporativa é que estes últimos não interferem na umidade do ar interior. Aconselha-se sua aplicação em lugares com temperatura de bulbo úmido não maiores que 25°C e valores máximos de temperatura de bulbo seco de 46°C (GIVONI, 1994).

A cidade de São Carlos localiza-se na latitude de 21° 48' sul, longitude de 48° 10' oeste e altitude média de 800m. O clima local pode ser considerado semi-úmido, sendo comum na região a ocorrência de períodos quentes e secos, favoráveis ao uso dos sistemas de refrigeração evaporativa. Conforme estudo realizado por RORIZ (2000), a cidade situa-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.1).



Diferenças Psicrométricas (TBS-TBU): 14 h, dia típico de Fevereiro

Figura 1: Diferenças Psicrométricas típicas às 14 horas de um dia de verão no Estado de São Paulo. (Adaptado de Roriz, 2000)

2 METODOLOGIA

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. 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).

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 (Figuras 2 e 3).

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.

Secagem das telhas: antes das medições na bancada, as telhas eram colocadas em forno por seis horas à temperatura aproximada de 80°C para a perda da umidade retida em seu interior. Ao retirá-las do forno, 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. O objetivo foi analisar de maneira genérica o material que é repassado ao consumidor, mantendo suas propriedades.

Confirmação do processo de secagem: antes de se iniciar o gotejamento, as telhas eram submetidas a 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 percebeu-se 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.



Figura 2: Bancada utilizada



Figura 3: Detalhe da inclinação da bancada

Instalação dos instrumentos: os sensores de temperatura foram fixados à superfície inferior das telhas (Figura 4) 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.

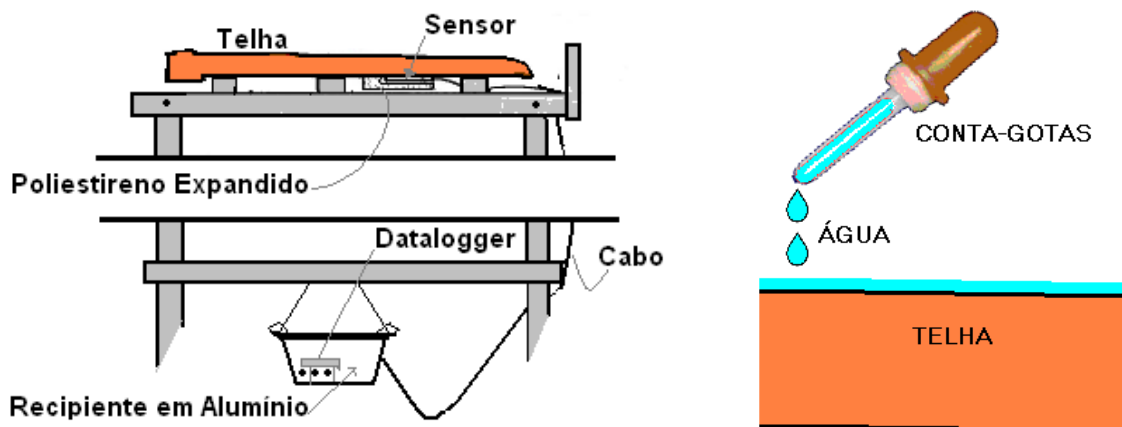


Figura 4: Esquemas de instalação dos instrumentos e de controle do gotejamento sobre a telha

Processo de umidificação: 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 aspersões com intervalos de 10 minutos, totalizando 6 aspersões 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. Constatou-se também que, para o volume de 20 ml, intervalos maiores que 10

minutos faziam com que a temperatura da telha voltasse a subir entre duas aspersões sucessivas, 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.

Certamente o processo de umidificação das telhas provoca alterações em suas densidades e em suas absorvâncias, mas estas alterações não foram quantificadas no presente trabalho.

3 RESULTADOS

Os experimentos demonstraram que as variações da irradiância solar e da incidência do vento sobre as telhas, provocam oscilações tanto nas temperatura da telha seca quanto da úmida, mas exercem pequena influência sobre as diferenças instantâneas as temperaturas de ambas (figuras 5 a 7)..

A diferença de temperatura entre a telha seca e a úmida chegou a 18,7 °C. As altas absorvâncias das telhas usadas no experimento contribuíram para acentuar a elevação de suas temperaturas.

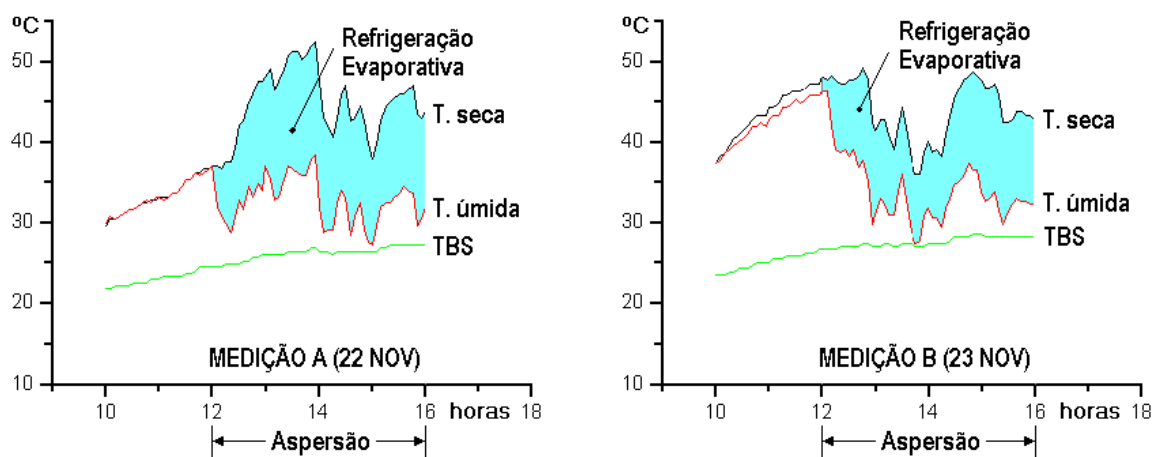


Figura 5: Temperaturas registradas nos dias 22 e 23 de novembro de 2004

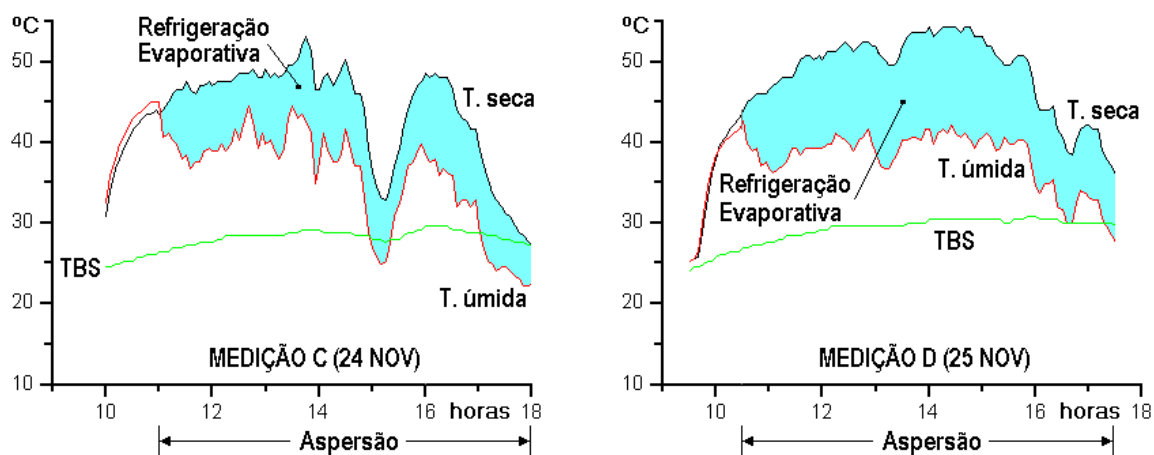


Figura 6: Temperaturas registradas nos dias 24 e 25 de novembro de 2004

Nos experimentos dos dias 23 e 24, observa-se pequenas diferenças entre as temperaturas das telhas mesmo antes do início da umidificação, provavelmente provocadas por algum resíduo de umidade após o processo de secagem das mesmas.

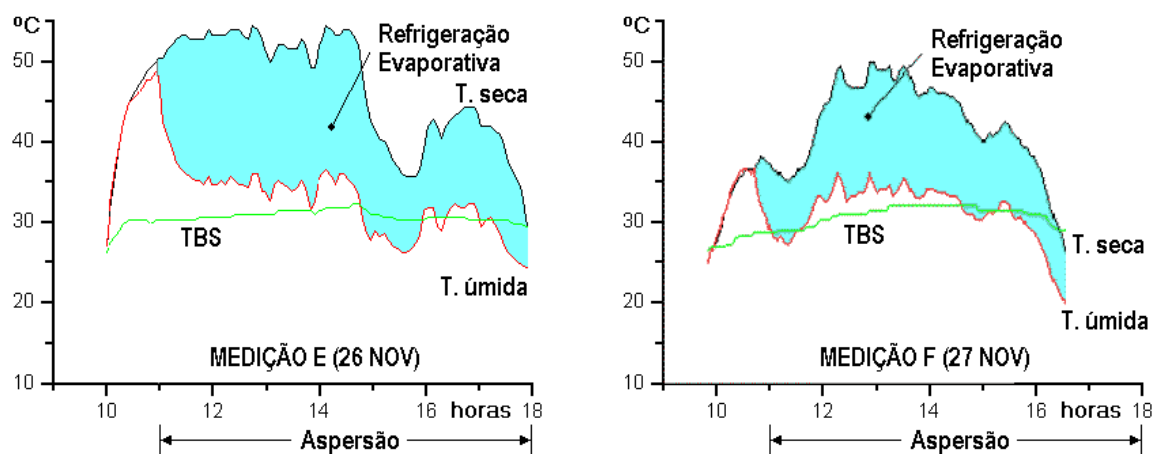


Figura 7: Temperaturas registradas nos dias 26 e 27 de novembro de 2004

A tabela 1 foi obtida a partir de dados registrados na estação climatológica da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de Paulo e apresenta as médias dos valores observados entre as 10 e as 18 horas dos mesmos dias dos monitoramentos.

Tabela 1: Condições médias do tempo durante os monitoramentos (EESC-USP)

dia (nov)	TBS (°C)	UR (%)	Irrad (W/m ²)	Vento (m/s)	Chuva (mm)
22	27.3	43.3	126	0.98	0
23	28.2	42.4	131	1.05	0
24	29.5	34.8	172	1.05	0
25	30.3	30.8	129	0.83	0
26	28.4	53.1	358	1.72	0
27	30.7	36.4	208	1.32	0

3.1 Quanto às Temperaturas Superficiais

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 2.

Tabela 2: Máximas Diferenças Superficiais - ΔTS (médias de cada meia hora) (°C)

dia	hora	TBS	ΔPSI	TSS	TSU	ΔTS
22	13:30	26,02	6,73	51,23	36,72	14,51
23	15:30	28,31	8,96	46,26	32,56	13,70
24	15:00	29,50	10,72	48,14	37,01	11,13
25	11:30	29,50	10,08	51,89	40,06	11,83
26	11:30	30,51	9,51	53,74	35,07	18,67
27	12:30	30,10	7,52	46,58	33,11	13,47

Onde:

TBS = Temperatura de Bulbo Seco

ΔPSI = TBS – TBU (diferença psicrométrica)

TSS = Temperatura superficial interna da telha seca

TSU = Temperatura superficial interna da telha úmida

ΔTS = 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, aplicando-os à Eq. 3.

Adotando-se a diferença entre as temperaturas superficiais internas (ΔTS) como indicador deste resfriamento, a análise de regressão linear múltipla indicou que ΔTS pode ser estimada em função de indicadores climáticos, psicrométricos, de vento, radiação solar e de temperaturas superficiais (Equação 3), sendo estas últimas dependentes da absorvância da superfície.

$$\Delta TS = 2,88 - 2,72 \Delta PSI + 0,37 TSS + 2,52 Ev - 6,66 Ven - 0,08 dVen - 0,16 dTSS + 0,13 Rad \quad [\text{Eq. 3}]$$

Onde:

ΔPSI = Diferença Psicrométrica ($^{\circ}\text{C}$)

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

Ev = Taxa de Evaporação

Ven = Velocidade do Vento (m/s)

dVen = Oscilação da Velocidade do Vento (m/s), observada entre duas medidas consecutivas.

dTSS = Oscilação da Temperatura Superficial na Telha Seca ($^{\circ}\text{C}$), observada entre duas medidas consecutivas.

Rad = Irradiância Solar (W/m^2)

A Equação 3 confirma conceitos da literatura especializada, pois o potencial de refrigeração dos sistemas evaporativos dependem das condições psicrométricas (ΔPSI), mas também das temperaturas da superfície do material (TSS), além de fatores climáticos como o vento e a radiação solar.

A Figura 8 permite comparar as relações entre ΔTS medidas e estimadas pela Equação 3, com coeficiente de correlação (R) de 0,89 e desvio padrão (DP) de 1,25.

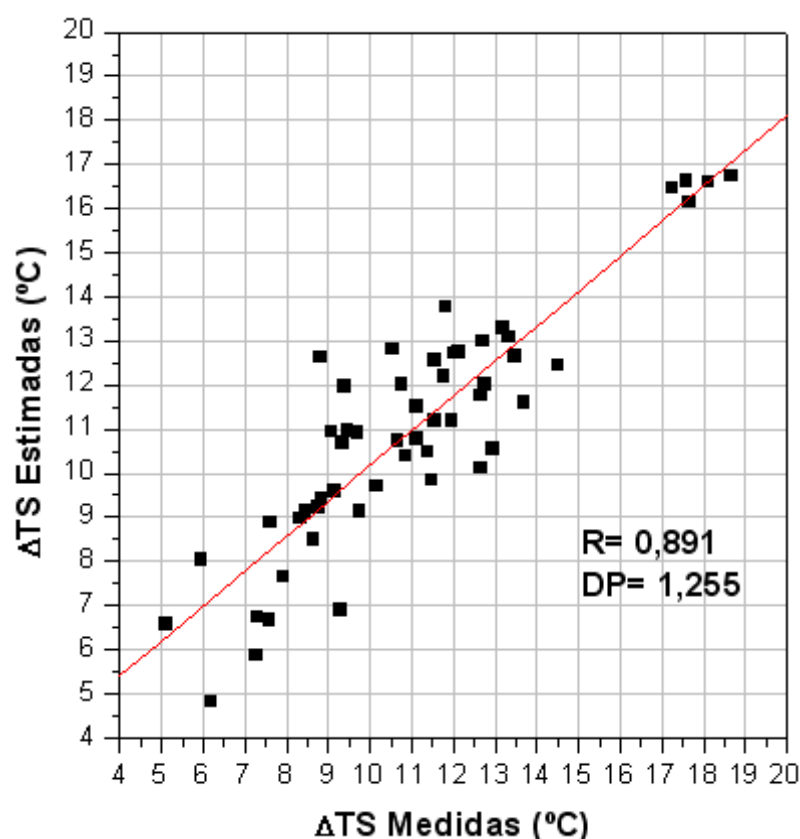


Fig. 8: ΔTS (diferenças entre as temperaturas superficiais) medidas e estimadas pela Equação 3

4 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os experimentos em bancada demonstraram que, sob as condições psicrométricas, de vento e de radiação solar indicadas, a evaporação reduziu a temperatura superficial interna das telhas de barro em até 18,67 °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 seca e a diferença psicrométrica, além das condições de velocidade do vento e de radiação solar direta. O coeficiente de correlação foi de 0,89 e o desvio padrão de 1,25.

Nas próximas etapas da pesquisa, pretende-se identificar os efeitos desse processo de refrigeração para outros tipos de telhas. Alguns testes com telhas de fibrocimento apresentaram resultados semelhantes aos aqui mencionados, confirmando o potencial do processo sob as condições climáticas de verão, na região de São Carlos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

GIVONI, B. (1994). “Passive and Low Energy Cooling of Buildings”. Pp 130-190. Van Nostrand Reinhold. New York, USA.

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.

GONZÁLEZ, E. 2003. “Técnicas de enfriamiento pasivo”. ENCAC 2003. Mini-Curso oferecido aos congressistas. Pontificia Universidade Católica do Paraná (PUC –PR). Curitiba, PR, 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.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, do Ministério da Educação, pela bolsa concedida para o desenvolvimento desta pesquisa.