



REFRIAMENTO EVAPORATIVO POR ASPERSÃO DE ÁGUA SOBRE TELHAS DE FIBROCIMENTO EM CLIMA SEMI-ÚMIDO

Victor Figueiredo Roriz; Maurício Roriz

Programa de Pós-Graduação em Construção Civil – Universidade Federal de São Carlos, Brasil
e-mails: vroriz@terra.com.br; m.roriz@terra.com.br

RESUMO

O artigo relata o desenvolvimento e os resultados de pesquisa de mestrado sobre resfriamento evaporativo por aspersão de água sobre telhas onduladas de fibrocimento, com o objetivo de avaliar a aplicabilidade deste sistema na redução dos ganhos de calor de edifícios submetidos a clima semi-úmido. A parte experimental da pesquisa foi realizada na cidade de São Carlos (SP). Com base em equações clássicas da mecânica dos fluidos, um modelo teórico foi proposto e aplicado em cálculos dos fluxos de calor na face superior da telha. Ao longo do trabalho, as equações foram ajustadas aos dados experimentais, medidos em uma célula-teste exposta ao clima local na qual foram monitoradas temperaturas superficiais de ambas as faces em duas telhas, uma seca e outra sob aspersão intermitente de água. Os resultados indicaram que, apesar de ser ainda passível de aperfeiçoamento, o modelo teórico já proporciona valores muito próximos dos dados medidos. Aplicando-se ao mesmo um fator estatístico de ajuste, obteve-se um coeficiente de correlação de 0,99 e um desvio padrão de 0,35 °C entre temperaturas superficiais medidas e estimadas. Para as condições climáticas registradas durante os períodos diurnos dos experimentos, o fluxo médio de calor por evaporação foi calculado em 409 W/m², correspondendo a uma taxa volumétrica média de água evaporada de 0,7 l/(m².h), valores muito significativos em relação às ordens de grandeza típicas dos processos de trocas de calor em edificações. Frente à crescente necessidade de economia de energia, este processo de resfriamento apresentou evidentes vantagens sobre os sistemas convencionais de condicionamento térmico.

Palavras-chave: Resfriamento Evaporativo, Refrigeração Evaporativa, Eficiência Energética, Arquitetura Bioclimática, Fluxo de Calor por Evaporação.

ABSTRACT

This paper presents the development and the results of master's degree research on evaporative cooling by aspersion of water on wavy fiber cement tiles, to evaluate the applicability of this system on the reduction of the heat gains of buildings submitted to semi-humid climate. The experimental part of the research was accomplished in the city of São Carlos (SP). Based on classic equations of the fluids mechanics, a theoretical model was proposed and applied in calculations of the heat flows at the top surface of the tile. Along the work, the equations were progressively adjusted to the experimental data, measured in a test-cell exposed to the local climate and in which superficial temperatures of both surfaces were monitored in two tiles, one dry and other under intermittent water aspersion. The research results indicated that, in spite of still being susceptible to improvement, the theoretical model already provides very close values of the measured data. Applying to it an statistical adjustment factor, was obtained a correlation coefficient of 0,99 and a standard deviation of 0,35 °C among measured and calculated temperatures. For the climatic conditions registered during the daylight periods of the experiments, the mean evaporative heat flow was calculated in 409 W/m², corresponding to an average evaporated water tax of 0,7 l / (m².h), very significant values regarding to the typical greatness orders of the heat flows processes in buildings. Confronted with the growing need for energy save, this process presents evident advantages over the conventional thermal conditioning systems.

Keywords: Evaporative Cooling, Energy Efficiency, Bioclimatic Architecture, Evaporative Heat Flow.

1 INTRODUÇÃO

O Resfriamento Evaporativo é uma das estratégias de refrigeração mais efetivas, devido ao enorme calor latente necessário para evaporação de água (TANG e ETZION, 2004). Para evaporar, a água absorve cerca de 2400 kJ por litro, ou o equivalente a todo o calor produzido por 7 lâmpadas incandescentes de 100 W em uma hora. Desde longa data este fenômeno tem sido explorado em sistemas mecânicos e na arquitetura de diversos países. No Brasil, entretanto, ainda é pouca difundida sua aplicação em condicionamento passivo de edificações.

Nesta pesquisa de mestrado (RORIZ, 2007), utilizou-se o sistema conhecido como indireto, que não altera a umidade interna do ambiente. Adotou-se a cobertura como trocador de calor, por seu importante papel nos ganhos térmicos dos edifícios. Entre os diversos tipos de cobertura, as telhas de fibrocimento foram escolhidas por sua larga aplicação, tanto em habitações populares quanto em edificações com grandes áreas cobertas, particularmente as industriais.

Pelo fato da água empregada no sistema ser evaporada sobre a cobertura, não existe necessidade de um prévio tratamento, possibilitando a reutilização da água doméstica e o aproveitamento de água de chuva.

Atualmente, este tipo de sistema vem sendo usado para reduzir o uso de condicionadores de ar em grandes edifícios industriais e comerciais. Apesar disso, este processo ainda é considerado emergente (DA SILVA, BELLINI, e LAMBERTS, 2003). O presente estudo aborda seu funcionamento e aplicabilidade.

2 OBJETIVOS

A pesquisa teve como principal objetivo desenvolver um modelo teórico para o cálculo dos fluxos de calor e das temperaturas superficiais de telhas onduladas de fibrocimento, sob sistema de resfriamento evaporativo por aspersão de água. Contou ainda com os seguintes objetivos específicos: Identificar a capacidade de resfriamento do sistema proposto, submetido ao clima da cidade de São Carlos, SP; Quantificar o consumo de água relacionado às reduções de temperatura para o mesmo clima; Identificar o efeito das ondulações sobre os fluxos de calor por radiação em ondas longas e curtas.

3 METODOLOGIA

Formulou-se um modelo teórico para o cálculo da redução da temperatura de telhas de fibrocimento, provocada por um sistema de resfriamento evaporativo indireto. Tal modelo foi desenvolvido baseado nas equações clássicas dos fenômenos de transporte, considerando um balanço entre os diversos fluxos de energia, a cada instante. Este modelo foi implementado em um software e ajustado estatisticamente, através dos resultados obtidos em uma série de experimentos em células de teste, construídas especificamente para este fim.

3.1 O Experimento

Foram construídas duas células-teste, constituídas por telhas de fibrocimento lixadas, pintadas e isoladas em suas faces inferiores. Sobre uma destas células, foi montado um sistema de aspersão intermitente de água, composto por um aspersor, dutos de água, duas bombas centrífugas (SARLO-SB2000) ligadas em série e um reservatório. Para controlar e registrar os dados deste sistema, a equipe do Professor Dr. Saulo Guths, da UFSC, desenvolveu um equipamento (Climus) e um software específico. Para minimizar a influência de superfícies próximas, as células-teste foram montadas em bancada sobre uma cobertura, conforme a figura 2.

Para aquisição dos dados de temperaturas do ar, umidades do ar e temperaturas superficiais das telhas, foram utilizados sensores tipo Onset - HOBO, montados em uma proteção contra radiação em aço-inox dotada de um exaustor. O fator de forma (FF) destas células de teste foi calculado em 0,139.



Figura 2 - Célula teste

A absorância da tinta utilizada em sua pintura, foi medida por Dornelles (2005) em um espectrofotômetro. Corrigida para o espectro solar padrão, resultou em 0,716. Para o registro da velocidade do vento, utilizou-se anemômetro digital (TAVR-650 – INSTRUTHERM), instalado sobre suporte rotativo, no sentido de manter o sensor do equipamento perpendicular à direção do vento.

Para medição da irradiância global sobre a superfície horizontal e das temperaturas da água na saída do aspersor, sobre a telha e na calha de coleta da água excedente, utilizou-se de um conjunto de equipamentos (sistema Campbell), gentilmente disponibilizados pelo Centro de Recursos Hídricos e Ecologia Aplicada (CRHEA) da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC-USP), através do professor Dr. Francisco A. S. Vecchia.

A coleta de dados foi feita em dois períodos: um teste piloto, realizado entre os dias 13 e 14 de fevereiro de 2007 e a coleta sistemática, que ocorreu entre abril e maio do mesmo ano.

3.2 Modelo teórico

A tabela 1 resume as variáveis consideradas neste trabalho e que são mencionadas nas equações apresentadas nos itens seguintes.

Tabela 1 – Unidades e Terminologia

Abreviação	Definição	Unidade
Q_{solar}	Fluxo de calor por radiação solar	W
Q_{conv}	Fluxo de calor por convecção do ar	W
Q_{evap}	Fluxo de calor por evaporação de água	W
Q_{conds}	Fluxo de calor por condensação de água	W
Q_{cond}	Fluxo de calor por condução através da telha	W
Q_{rad}	Fluxo de calor por radiação de ondas longas	W
Q_{H2O}	Fluxo de calor por convecção da água	W
Q_{sol_dir}	Fluxo absorvido de energia da radiação solar direta	W
Q_{sol_dif}	Fluxo absorvido de energia da radiação solar difusa	W
T_{sup}	Temperatura da película (mesma que a da superfície exterior da telha, Tse)	°C, K
T_{bs}	Temperatura do ar ambiente	°C
T_{ceu}	Temperatura efetiva do céu	K
T_{se}	Temperatura superficial externa (superior) da telha	°C
T_{si}	Temperatura superficial interna (inferior) da telha	°C

Tabela 1 – Unidades e Terminologia (Continuação)

α_2	Absortância da telha (medida em espectrofotômetro, ajustada para o espectro solar padrão e corrigida em função das ondulações da telha).	-
A	Área de projeção da cobertura sobre o plano horizontal	m^2
C	Calor específico da água (4186,8)	$\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$
Cl	Calor latente de vaporização da água	J/kg
hc	Coeficiente de convecção (função do número de Nusselt)	
k	Condutividade térmica da telha	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
σ	Constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8}$)	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$
ΔT	Diferença entre a temperatura da água aspergida e a que, sem evaporar, escoa para a calha	K
E_{sup}	Emissividade da telha	-
E_{ceu}	Emissividade efetiva do céu	-
L	Espessura da telha	m
$fcAr$	Fator de correção da área (área superficial sobre área de projeção)	-
FF	Fator de forma da telha (parcela de energia refletida pela telha sobre ela mesma)	-
mw	Fluxo de massa de água evaporada	$\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$
Δt	Intervalo de tempo considerado	s
I_{dif}	Irradiância difusa sobre o plano horizontal	W/m^2
I_{dir}	Irradiância direta sobre o plano horizontal	W/m^2
M	Massa de água que escorre sobre a telha no intervalo de tempo Δt	kg
T_{sup}	Temperatura da película (mesma que a da superfície exterior da telha, T_{se})	$^{\circ}\text{C}$ ou K
T_{bs}	Temperatura do ar ambiente	$^{\circ}\text{C}$
T_{ceu}	Temperatura efetiva do céu	K
T_{se}	Temperatura superficial externa (superior) da telha	$^{\circ}\text{C}$
T_{si}	Temperatura superficial interna (inferior) da telha	$^{\circ}\text{C}$

Para a modelagem da evaporação de água sobre a telha, considerou-se um balanço de energia entre os fluxos instantâneos em um volume de controle que abrange apenas a superfície superior da telha, conforme a figura 1. Adotou-se a hipótese de que nos momentos em que a água é aspergida, exista sobre a telha uma película de água, cuja temperatura (T_{sup}) seja igual à temperatura superficial externa da telha (T_{se}). A equação 1 corresponde ao balanço de energia no volume de controle.

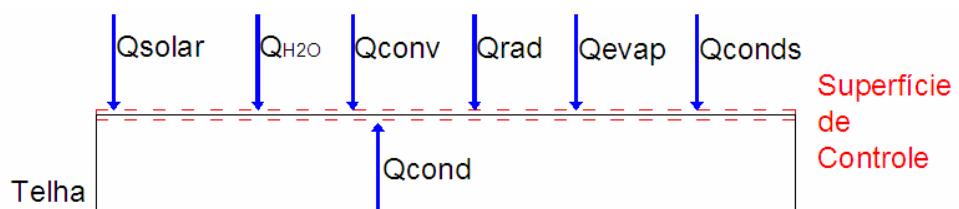


Figura 1 - Modelo físico proposto

$$Q_{\text{cond}} + Q_{\text{conv}} + Q_{\text{rad}} + Q_{\text{solar}} + Q_{\text{evap}} + Q_{\text{H2O}} + Q_{\text{conds}} = 0 \quad (\text{Eq.1})$$

Os fluxos de calor (em W) são calculados pelas equações a seguir, adaptadas de Chiasson et al (2000) (Eq. 3, 4 e 5), González (2002) (Eq. 7) e Incropera e Dewitt (1996) (Eq. 9), sendo os fluxos por evaporação ou condensação calculados pela equação 5.

$Q_{solar} = Q_{sol_dir} + Q_{sol_dif}$	(Eq. 2)	$Q_{sol_dif} = I_{dif} \cdot (1 - FF) \cdot \alpha_2 \cdot A \cdot fcAr$	(Eq. 6)
$Q_{sol_dir} = I_{dir} \cdot \alpha_2 \cdot A$	(Eq. 3)	$Q_{rad} = \sigma \cdot (1 - FF) \cdot (E_{ceu} \cdot T_{ceu}^4 - E_{sup} \cdot T_{sup}^4) \cdot A$	(Eq. 7)
$Q_{conv} = hc \cdot A \cdot (T_{bs} - T_{sup})$	(Eq. 4)	$Q_{H2O} = m \cdot c \cdot \Delta T / \Delta t$	(Eq. 8)
$Q_{evap} = Cl \cdot A \cdot mw$	(Eq. 5)	$Q_{cond} = \frac{A \cdot fcAr \cdot k \cdot (T_{si} - T_{se})}{L}$	(Eq. 9)

Exceto os fluxos solares, todos os outros são funções da temperatura da película (T_{sup}), fato que torna possível calcular, por meio de iterações, a temperatura superficial que satisfaça a equação 1.

4 RESULTADOS

4.1 Dados Coletados

Do total de dados coletados, uma parcela foi descartada, por problemas nos diversos equipamentos registradores, ou pela ocorrência de chuvas. Após esta seleção, restaram cerca de 11000 conjuntos de dados registrados a intervalos de 1 minuto, que posteriormente foram agrupados em médias correspondentes a intervalos de 30 minutos. A figura 3 apresenta um conjunto típico dos dados coletados, onde a diferença de temperaturas (área destacada) soma 51°C.h (entre as 9 e as 18 h).

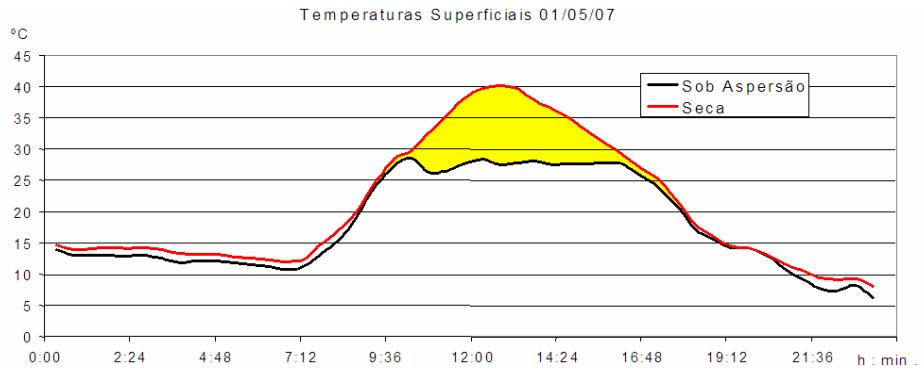


Figura 3 - Conjunto típico de temperaturas superficiais medidas

4.2 Avaliação do Modelo Teórico

Dois critérios foram adotados para verificar e corrigir as estimativas dos fluxos de calor obtidas pelo modelo proposto. Em um primeiro caso, calculou-se os fluxos de calor a partir dos dados medidos de temperatura superficial e considerou-se o erro como a soma dos fluxos, uma vez que, para o volume de controle (superfície externa da telha), esta soma deveria ser nula (Eq.10). Em uma segunda hipótese, por meio de iterações, calculou-se uma temperatura (T_{sup}), que anula esta mesma soma. Desta forma, o erro do modelo foi considerado como a diferença entre esta temperatura calculada e a temperatura medida na superfície externa da telha sob aspersão (T_{seUmi}), conforme a equação 11.

$$Q_{cond} + Q_{conv} + Q_{rad} + Q_{solar} + Q_{evap} + Q_{H2O} + Q_{cond} = Erro1 \quad (\text{Eq.10})$$

$$T_{sup} - T_{seUmi} = Erro2 \quad (\text{Eq.11})$$

Supondo que a telha apresente condutância de 58 (W/m².K) (valor tabelado em INCROPERA e DEWITT, 1996) e calculando iterativamente os fluxos de calor, obtém-se uma relação entre as temperaturas medidas (TseUmi) e as temperaturas estimadas pelo modelo (Tsup), com coeficiente de correlação (R) de 0,98 e desvio padrão (dp) de 1,14 °C, conforme a figura 4. Plotando os fluxos de calor obtidos pela iteração versus a diferença entre a temperatura estimada pela iteração e a medida (Erro2) obtém-se o gráfico mostrado na figura 5.

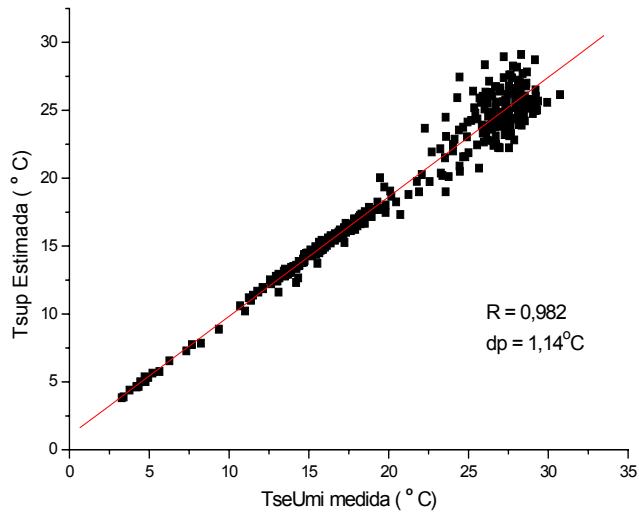


Figura 4 - Temperaturas Medidas (TseUmi) e Estimadas (Tsup)

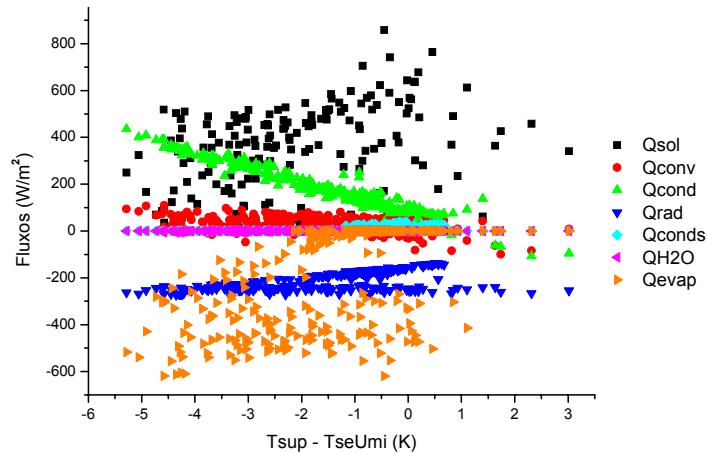


Figura 5 - Fluxos de Calor versus Erro2

Relacionando cada um destes fluxos de calor à diferença de temperaturas (Erro2), é possível verificar qual é a contribuição relativa de cada um para esta diferença. Como resultado deste estudo, observou-se que o fluxo de calor que individualmente melhor se relaciona com o erro da iteração ($T_{\text{sup}} - T_{\text{seUmi}}$) é o fluxo por condução. Para minimizar este erro, calculou-se qual seria a condutância que anularia a soma dos fluxos em cada instante, obtendo-se a distribuição apresentada na figura 6 e correspondendo a um valor médio para a condutância de 94,91 (W/m².K).

Realizando nova iteração com o valor estimado de condutância, obteve-se uma relação entre as temperaturas medidas (TseUmi) e estimadas (Tsup) conforme a figura 7.

Calculando os fluxos a partir das temperaturas superficiais medidas e condutância com o valor estimado de 94,91 (W/m².K), obtém-se a relação demonstrada na figura 8.

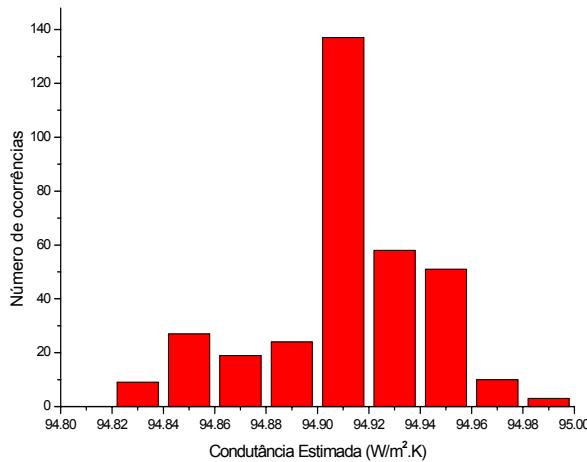


Fig. 6 - Distribuição Normal das Condutâncias Estimadas

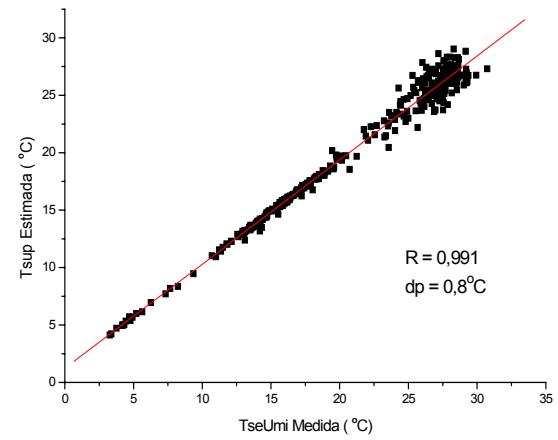


Fig. 7 - Temperaturas Medidas (TseUmi) e Estimadas (Tsup) para Condutância de 94,91 (W/m².K)

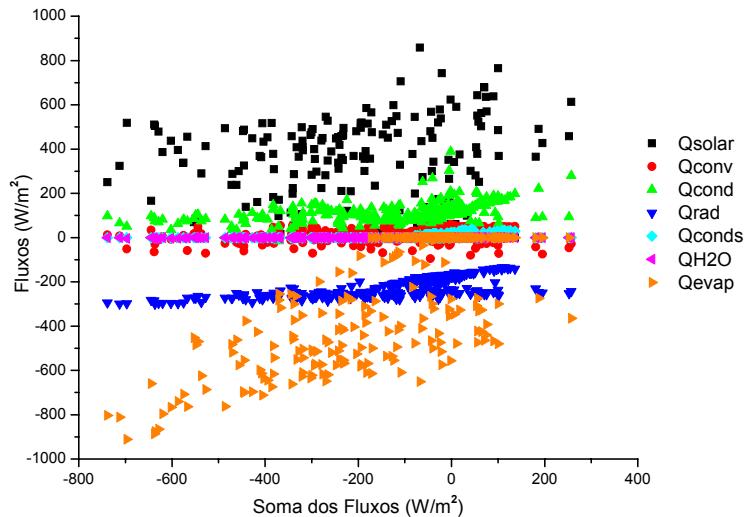


Figura 8 - Fluxos de Calor x Soma dos Fluxos (Condutância de 94,91 (W/m².K))

Considerando que o fluxo por condução esteja corrigido e que os fluxos por condensação (Qconds) e por convecção de água (QH2O) tenham pouca correlação com o erro total (considerado neste caso a soma dos fluxos = Erro1), é possível obter uma regressão múltipla que relate estatisticamente o erro aos fluxos restantes, resultando em um ajuste com as seguintes equações:

$$A_j = 227,949 + 1,133.Q_{solar} + 1,496.Q_{conv} + 1,65.Q_{rad} + 1,001.Q_{evap} \quad (\text{Eq.12})$$

$$\left(\sum Q \right) - A_j = 0 \quad (\text{Eq.13})$$

Adotando esta equação como ajuste estatístico do modelo, os fluxos podem ser calculados de forma iterativa considerando o erro da iteração como a soma dos fluxos menos este ajuste (Eq.13). A relação entre as temperaturas obtidas pela iteração (Tsup) desta forma e as medidas (TseUmi) pode ser vista na figura 9.

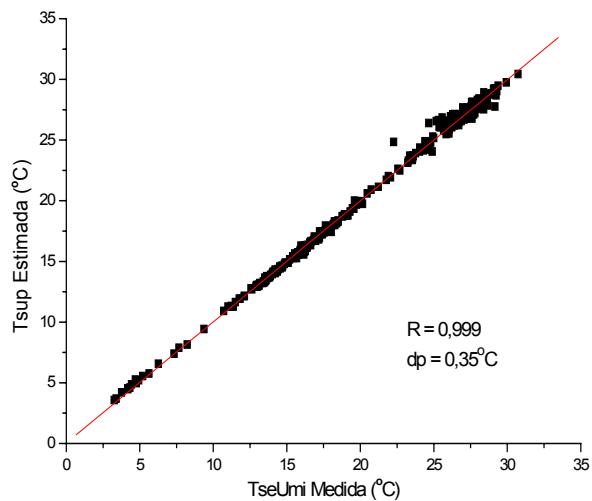


Figura 9 - Temperaturas Medidas (TseUmi) e Estimadas (Tsup) com correção estatística

Plotando os fluxos de calor versus a diferença entre a temperatura estimada e a medida (Erro2) obtém-se a figura 10. A relação entre os fluxos e a temperatura da superfície pode ser vista na figura 11.

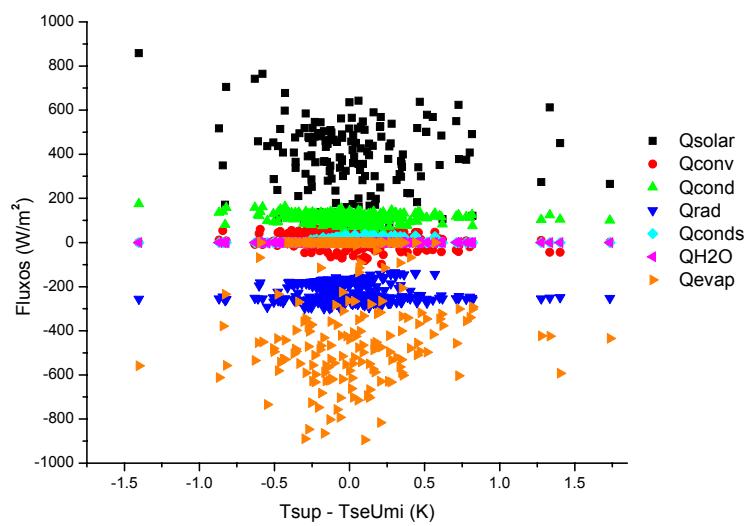


Figura 10 - Fluxos de Calor x Erro2, com correção estatística

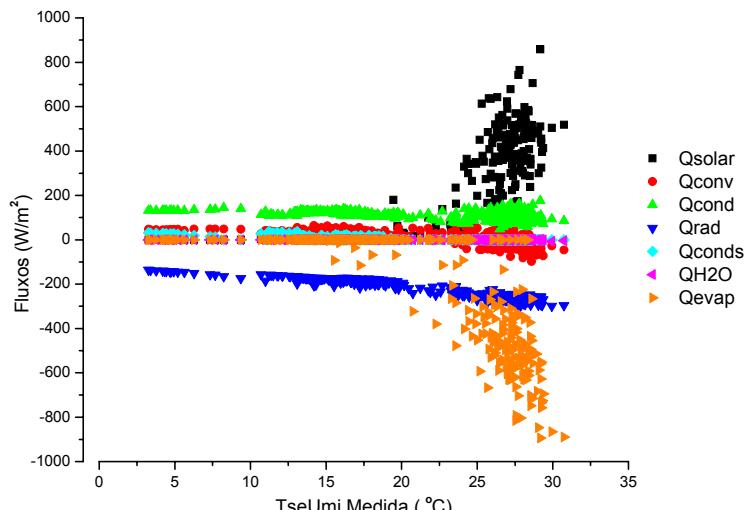


Figura 11 - Fluxos de Calor x Temperaturas Medidas (TseUmi)

Para o período entre o nascer e por do sol, a tabela 2 apresenta os valores médios dos fluxos de calor envolvidos no processo (média entre todos os valores instantâneos medidos), além dos desvios padrão, mínimo e máximo globais e amplitudes destes valores. Estes fluxos foram calculados utilizando o processo de iteração e o ajuste estatístico conforme a equação 13.

Tabela 2 - Dados Estatísticos dos Fluxos Obtidos pela Iteração Corrigida para Período Diurno (W/m²)

Fluxo	Média	Desv. Pad.	Mínimo	Máximo	Amplitude
Qsolar	348,99	186,39	12,74	858,46	845,72
Qconv	-1,91	31,02	-98,63	63,68	162,31
Qcond	106,79	23,71	47,58	175,11	127,53
Qrad	-256,46	20,49	-298,43	-180,11	118,32
Qconds	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
QH2O	-0,56	1,06	-7,31	1,07	8,38
Qevap	-408,88	231,90	-894,62	0,00	894,62
Ajuste Estimado	-212,01	203,75	-779,77	264,04	1043,81

Para um dia médio, os fluxos de calor têm um comportamento conforme demonstrado na figura 12.

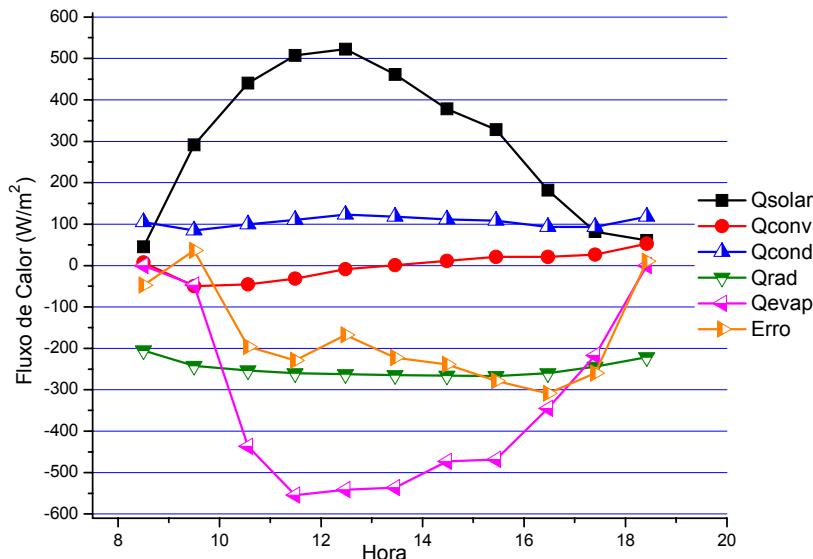


Figura 12 - Fluxos Obtidos pela Iteração Corrigida para Período Diurno de Um Dia Médio

4.3 Conclusões

Pela observação dos resultados obtidos nos experimentos e dos resultados apresentados pelo modelo proposto, constata-se que apesar de conterem imprecisões, as estimativas dos fluxos de evaporação já demonstram a grande importância deste fluxo no balanço de energia das superfícies sob aspersão.

Através do modelo iterativo de cálculo proposto, com um ajuste estatístico sobre os fluxos de calor, obteve-se estimativas muito próximas aos valores medidos das temperaturas da telha sob aspersão, demonstrando consistência do modelo. Com base nos dados obtidos nos experimentos, é possível concluir que este sistema de resfriamento tem grande potencial de aplicação e que apesar de um difícil equacionamento, o modelo aqui apresentado tem boa correlação com os resultados obtidos. A possibilidade de uso de água de chuva torna esta alternativa ainda mais atraente, uma vez que traz um grande benefício a um custo extremamente baixo. A aplicação deste sistema de resfriamento em edificações onde a principal fonte de calor seja o “envelope” do edifício, deve causar forte impacto, lembrando que o modelo proposto foi desenvolvido para coberturas, mas é facilmente adaptável às superfícies verticais.

Finalmente, o fluxo de calor por evaporação, alvo central desta pesquisa, foi estimado de forma bastante precisa, alcançando valores médios superiores aos demais fluxos (Tabela 2), o que resultaria em significativa redução da temperatura da telha nos momentos de interesse. O volume médio de água evaporada ficou em 0,7 (L/m².h). Graças ao processo evaporativo, a telha sob aspersão apresentou, para o período diurno, temperatura superficial média de 5,12 K abaixo da registrada na telha seca. A complexidade dos mecanismos envolvidos nos fenômenos estudados não permitiu seu completo equacionamento no espaço de tempo que a ela foi destinado, mas a pesquisa aqui descrita já contribuiu para melhor compreensão da natureza destes fenômenos.

5 REFERÊNCIAS

- CHIASSON, A.D. et al. A model for simulating the performance of a shallow pond as a supplemental heat rejecter with closed-loop ground-source heat pump systems. Building and Environmental Thermal Systems Research Group, Oklahoma State University, v.106, n.2, 107-121. 2000. Disponível em: <www.hvac.okstate.edu> . Acesso em: 23/07/07.
- DA SILVA, A.; BELLINI, J.; LAMBERTS, R. Spray vaporization for evaporative cooling of buildings In: Proceedings of INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE, 8., 2003, Eindhoven, Netherlands. Eindhoven: IBPSA, 2003. v. 1. p. 1209 - 1216.
- DORNELLES, K. Relatório interno de experimento. 2005. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2005. Não publicado.
- GONZÁLES, E. M. Enfriamiento radiactivo en edificaciones. Notas del Curso de Actualización Sistemas de Enfriamiento Aplicados a la Vivienda. Universidad de Guadalajara y CYTED. Guadalajara, 2002.
- INCROPERA, F. P.; DEWITT, D.P. Fundamentals of heat and mass transfer. 4. ed. New York: John Wiley and Sons, 1996.
- RORIZ, V. F. Refrigeração Evaporativa por Aspersão em Telhas de Fibrocimento: Estudo Teórico e Experimental. 2007. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós graduação em Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2007.
- TANG, R.; ETZION, Y. On thermal performance of an improved roof pond for cooling buildings. Building and Environment, Oxford, n. 39, p. 201-209, 2004.

6 AGRADECIMENTOS

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