

## **AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO TÉRMICO E ENERGÉTICO DE COBERTURAS EM CLIMA TROPICAL CONTINENTAL**

**Simone B. Büttner (1); Denise Duarte (2)**

(1) Arquiteta, Mestre em Arquitetura e Urbanismo, simoneberigo@hotmail.com

(2) Dra, Professora do Departamento de Tecnologia, dduarte@terra.com.br

Universidade de São Paulo, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, Laboratório de Conforto Ambiental e Eficiência Energética – Labaut. Rua do Lago, 876, São Paulo - SP, Tel.: (11) 3091 4644

### **RESUMO**

O objetivo desta pesquisa foi avaliar o desempenho térmico e energético de coberturas em edificações comerciais de partido horizontal, na região de clima tropical continental, nas quais a vedação superior é o elemento mais exposto às condições ambientais externas. A avaliação se deu a partir de uma análise comparativa de diferentes soluções de projeto, considerando como parâmetro a temperatura do ar interno e a carga térmica de resfriamento. Foram selecionadas amostras de diversas tipologias construtivas, com novos materiais e componentes existentes no mercado, cujo desempenho térmico ainda é pouco conhecido. Foram realizadas simulações computacionais no programa *Energy Plus*, cujos resultados demonstram com clareza quais os sistemas de cobertura que apresentam um melhor desempenho térmico e energético para a localidade. Além dos componentes avaliados, estudou-se a possibilidade de aplicar duas estratégias passivas de atenuação da carga térmica proveniente da cobertura, o resfriamento evaporativo por meio de aspersão de água na cobertura e o sombreamento por meio de telas de proteção. Constatou-se que algumas soluções simples e/ou de baixo custo atingem resultados semelhantes ou mesmo superiores às técnicas mais sofisticadas, assim como, por exemplo, as barreiras radiantes, que contribuem significativamente na redução da carga térmica interna. Ao final, foram disponibilizadas as alternativas de aplicação em coberturas e seus respectivos resultados quanto ao desempenho térmico, visando orientar as decisões de projeto de coberturas para que as futuras edificações ofereçam melhores condições de conforto térmico aos usuários e a otimização do consumo energético devido à climatização artificial.

Palavras-chave: coberturas, simulação computacional, desempenho térmico.

### **ABSTRACT**

The aim of this research is to analyze the thermal and energy performance of single-story commercial building roofs, in the continental tropical climate region of Brazil, in which the horizontal surface represents the greatest thermal gains. The evaluation was done by the comparative analysis among some design solutions, taken as parameters the internal air temperature and the cooling rate. Different typologies with new building components and materials, whose thermal performance are still not well known, were selected. Computer simulations were done, using *Energy Plus* software, and the results showed the roof systems with the better thermal and energy performances for the local climate conditions. Not only the components were evaluated, but two passive cooling techniques aiming to minimize the heat flux through the roof: the evaporative cooling, with water springing over the roof, and the solar shading, using a kind of screen protection. It was showed that some simple or/and low cost solutions allows similar or better results than expensive solutions, so as the radiant barrier, for example, that may reduce the heat flux through the roof. At the end, this work presents some options of roof systems with their thermal and energy performance, to support roof building design, aiming to improve thermal comfort level for the users with less energy consumption by air conditioning.

Keywords: roofs, computer simulation, thermal performance.

## **1. INTRODUÇÃO**

A temperatura interna de uma edificação depende dos parâmetros climatológicos externos da envoltória e das cargas internas, tais como as atividades humanas, iluminação artificial e equipamentos existentes. Estes parâmetros interagem entre si e com a edificação, por meio das envoltórias, onde ocorrem os fenômenos de transferência de calor.

Em cidades de clima tropical, as edificações ficam expostas à radiação solar intensa e às elevadas temperaturas do ar e superficiais, podendo resultar em ambientes internos desconfortáveis e de baixa eficiência energética. Para alcançar o conforto térmico é necessário controlar a carga térmica externa e, dependendo do grau de aquecimento, remover o excesso de calor no ambiente, buscando atingir condições adequadas para a atividade e o bem estar humano. É na etapa inicial do projeto de arquitetura que se deve buscar soluções que visam a proteção em relação ao ambiente externo, por meio da orientação do edifício, do uso de materiais adequados e tecnologias passivas e/ou de baixo consumo de energia para o condicionamento ambiental, entre outras preocupações recorrentes.

No que diz respeito às envoltórias, a cobertura é o principal componente responsável pelo aumento da carga térmica no ambiente construído, principalmente em edificações predominantemente horizontais, onde este elemento representa a maior área exposta ao meio exterior e durante maior período ao longo do dia. Uma das soluções que têm sido adotadas para satisfazer as condições de conforto no interior das edificações é a climatização artificial. Porém, esta apresenta a desvantagem quanto à qualidade do ar (quando a manutenção deixa a desejar) e, principalmente, ao grande consumo de energia, refletindo em custos elevados para o usuário e na degradação do meio ambiente. Segundo dados do BEN-Balanco Energético Nacional (2003), o setor dos edifícios é responsável por cerca de 24% do total do consumo de energia elétrica do país, excluindo-se o setor industrial. Do consumo total de energia elétrica, no ano de 2005, o setor industrial foi responsável por 46,7%, o residencial por 22,2%, o comercial por 14,3% e o público por 8,7% do consumo (BEN, 2006). No Brasil, segundo o Procel (1998), a iluminação e o ar condicionado são os grandes consumidores de energia no setor de edifícios comerciais e públicos, sendo o condicionamento de ambientes responsável, em média, por 50% da energia elétrica consumida em um edifício comercial típico.

Com o atual panorama da crise energética mundial, a preocupação com os aspectos ambientais e de sustentabilidade na sociedade em geral tem levado ao desenvolvimento de novas tecnologias construtivas com menor impacto ambiental. Em especial, os projetistas e fabricantes de materiais de construção civil têm buscado novas alternativas no que se refere ao desempenho térmico de coberturas para climas quentes. Há diversas possibilidades de se reduzir o fluxo de calor através da cobertura utilizando-se tecnologias passivas, assim como, por exemplo, adotando-se a ventilação natural no ático das edificações, que reduz o fluxo de calor para o forro, pelo mecanismo da convecção que retira calor das telhas, reduzindo sua temperatura. A utilização de materiais isolantes, como o poliestireno expandido e a lã de vidro, reduz o fluxo de calor por condução e a barreira de radiação, uma película de metal polido de baixa emissividade, colocada abaixo das telhas, reduz a transferência de calor por radiação para o forro.

Com a avaliação do comportamento térmico de novos materiais e dos fenômenos físicos decorrentes das estratégias de resfriamento aplicados no conjunto da cobertura, é possível uma melhor compreensão nos processos de transferência de energia que ocorrem numa edificação. Algumas iniciativas do governo, em parceria com entidades envolvidas com a questão energética, demonstram interesse nestes trabalhos, já que é mais viável e racional investir em pesquisa para a redução do consumo energético do que investir na geração de energia elétrica. Cabe então aos profissionais da construção civil tomar medidas neste sentido, priorizando as estratégias passivas de projeto por meio da escolha dos materiais das envoltórias, principalmente da cobertura, e de técnicas de resfriamento passivo e/ou de baixo consumo de energia. Uma vez conhecidos os fenômenos físicos de trocas térmicas e as propriedades termofísicas dos materiais, é possível adequar a construção ao clima, propiciando um ambiente interno mais confortável com o mínimo de consumo energético. Estas medidas devem ser incorporadas ao projeto desde a fase de concepção arquitetônica, evitando posteriormente a necessidade de medidas corretivas, que nem sempre são igualmente satisfatórias.

## **2. OBJETIVO**

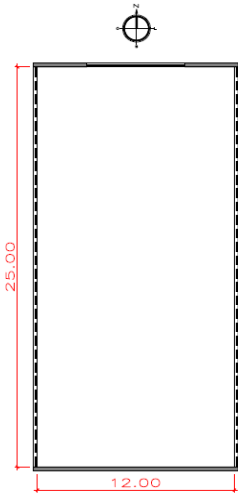
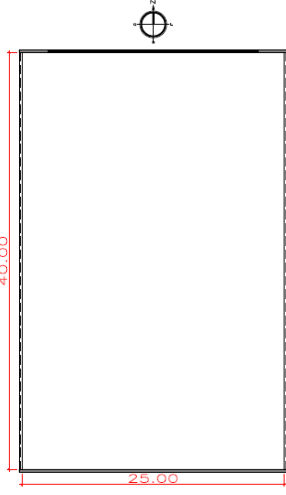
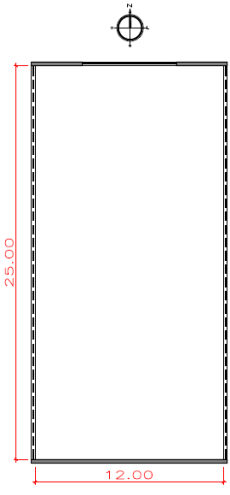
O objetivo é avaliar quantitativamente o desempenho térmico e energético de quatro tipologias de coberturas com variações quanto à cor e à composição do sistema, na região tropical continental brasileira, sob condições de clima rigoroso, com duas estações bem definidas (quente-seca e quente-úmida), fazendo uso de estratégias de proteção solar e de resfriamento de baixo consumo (resfriamento evaporativo) para minimizar a carga térmica interna da edificação.

### 3. MÉTODO

O estudo de alternativas para esta pesquisa se deu por meio do programa Energy Plus (v.2.2), cujos dados de entrada foram definidos a partir de um levantamento de dados primários e secundários, que possibilitaram a definição do modelo, dos componentes de coberturas e subcoberturas, das estratégias de atenuação da carga térmica, além dos dados climáticos e de propriedades dos materiais. As avaliações foram feitas para 03 (três) dias de referência do clima local (quente-seco, quente-úmido e situação extrema de calor).

#### 3.1. Definição do modelo computacional representativo

Buscou-se representar a tipologia de galpões mais usual, em se tratando de forma e dimensões, na cidade de Cuiabá - MT, cujo clima foi considerado como referência para o clima tropical continental. Assim, foi definida uma tipologia mais representativa, caracterizada pela planta retangular, variando-se as dimensões e proporções. Quanto às características construtivas foram adotadas paredes de tijolo cerâmico de oito furos, com argamassa; piso de concreto e cimento, alternando-se a cobertura, conforme o componente avaliado. Para efeito de comparação, três modelos foram utilizados na avaliação, com as seguintes características:

MODELO 01	MODELO 02	MODELO 03
<b>Área (m<sup>2</sup>):</b> 12 x 25 = 300 m <sup>2</sup> <b>Altura (m):</b> 5 m <b>Volume (m<sup>3</sup>):</b> 1500 m <sup>3</sup> <b>Aberturas:</b> Portas: 6 x 2,5 = 15 m <sup>2</sup> Janelas: 2x25x0,50 = 25m <sup>2</sup> (peitoril: 4m) Total: 40 m <sup>2</sup>	<b>Área (m<sup>2</sup>):</b> 25 x 40 = 1000 m <sup>2</sup> <b>Altura (m):</b> 5 m <b>Volume (m<sup>3</sup>):</b> 5000 m <sup>3</sup> <b>Aberturas:</b> Portas: 20 x 2,5 = 50 m <sup>2</sup> Janelas: 2x40x1,04 = 83,2m <sup>2</sup> (peitoril:3,46m) Total: 133,2 m <sup>2</sup>	<b>Área (m<sup>2</sup>):</b> 12 x 25 = 300 m <sup>2</sup> <b>Altura (m):</b> 16,66 m <b>Volume (m<sup>3</sup>):</b> 5000 m <sup>3</sup> <b>Aberturas:</b> Portas: 10,0 x 5,0 = 50 m <sup>2</sup> Janelas: 2 x25x1,664 = 83,2m <sup>2</sup> (peitoril:2,84m) Total: 133,2 m <sup>2</sup>
		
Figura 1 – Planta e perspectiva do modelo 01	Figura 2 - Planta e perspectiva do modelo 02	Figura 3 - Planta e perspectiva do modelo 03

### 3.2. Definição dos componentes de cobertura e subcobertura

#### 3.2.1. Telha isolante tipo sanduíche (C01)

**Composição:** Núcleo de EPS revestida com chapas de aço pré-pintadas. EPS (poliestireno expandido) com densidade média  $D = 14,5 \text{ kg/m}^3$  classe F (auto-extinguível), livre de CFC

**Características gerais:** Coeficiente Global de Transmissão térmica:  $0,63 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ; espessura isolante: 50 mm; espessura revestimento: 43 mm; condutibilidade térmica EPS:  $0,033 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ; densidade:  $200 \text{ kg/m}^3$  (Peso próprio =  $10 \text{ kg/m}^2$ ); cor externa: branco

#### 3.2.2. Telha Asfáltica (C02)

**Composição:** De fora para dentro: Pintura de proteção, folha de alumínio gofrado, asfalto tratado, lâmina de aço, asfalto anticorrosivo e folha de alumínio

**Características Gerais:** Coeficiente Global de Transmissão térmica: ASTM C236-54T  $K=0,25 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ ; espessura: 2 mm; densidade:  $2075 \text{ kg/m}^3$  (Peso próprio:  $4,15 \text{ kg/m}^2$ ); condutibilidade térmica:  $0,21 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  (até  $80^\circ\text{C}$ ); cor externa: branco e marrom

### 3.2.3. Telha de fibras orgânicas vegetais (C03)

Composição:	Monocamada de fibras orgânicas vegetais (impregnada de asfalto) e resina (resistente aos raios UV)
Características Gerais:	Coefficiente Global de Transmissão térmica: dado não obtido; espessura: 3 mm; densidade: 2133 kg/m <sup>3</sup> (Peso próprio: 6,4 kg/m <sup>2</sup> ); condutibilidade térmica: 0,99 W/m°C; cor externa: vermelho (de fábrica) e branca (pintura)

### 3.2.4. Telha metálica simples com forro de PVC (C04)

Composição:	Chapa simples de aço pré-pintado, camada de ar de 25 cm; forro de pvc
Características Gerais – aço:	Espessura: 0,43 mm; densidade: 960 Kg / m <sup>3</sup> (Peso próprio: 4,13 Kg / m <sup>2</sup> ); condutibilidade térmica: 52 W/m°C; cor externa: metálico e branco
Características Gerais – pvc:	Espessura: 10mm; densidade: 1350 Kg/ m <sup>3</sup> (Peso próprio: 13,5 Kg / m <sup>2</sup> ); condutibilidade térmica: 0,20 W/m°C; cor: branco

### 3.2.5. Componente de subcobertura

Composição	Barreira radiante: Lâmina refletiva composta de foil de alumínio em ambas as faces e uma trama de reforço entre as faces.
Características Gerais	Resistência Térmica: 2,42 m <sup>2</sup> °C /W; emissividade da superfície: 0,1; certificado de qualidade: IPT n° 858326

## 3.3. Estratégias de atenuação da carga térmica

### 3.3.1. Sombreamento

Trata-se do controle de radiação solar incidente na cobertura, reduzindo a carga térmica que chega ao ambiente interno. Aplicou-se sobre a cobertura uma tela termoplástica produzida em monofilamentos (redondo) de polietileno de alta densidade, na cor branca, espessura de 2mm, condutibilidade térmica de 0,4 W/m°C e emissividade de 0,9. A tela permite 80% de proteção contra radiação solar direta (transmissão de 20% da radiação solar). Considerou-se um espaço de ventilação de 50 cm entre a telha e a tela.

### 3.3.2. Resfriamento Evaporativo

Refere-se ao resfriamento evaporativo indireto por aspersão de gotas de água. O sistema adotado consiste em um equipamento automático e sensível à radiação solar. À medida que a temperatura superficial da cobertura atinge determinado limite pré-estabelecido, o sistema é acionado, passando a pulverizar gotículas de água sobre a cobertura, em intervalos que variam com a temperatura e a intensidade de radiação solar. A água pulverizada resfria a cobertura e, ao absorver o calor, evapora totalmente, evitando o acúmulo e o desperdício de água. O sistema age tanto na redução da carga térmica solar quanto na dissipação da carga gerada internamente por pessoas, iluminação e equipamentos, reduzindo as temperaturas internas do ar e radiante para edifícios não climatizados e diminuindo o consumo de energia em edifícios climatizados artificialmente.

## 3.4. Etapas de simulação:

### 3.4.1. Etapa 01: Avaliação de componentes de cobertura e subcobertura.

Visa avaliar o desempenho térmico dos componentes de cobertura isoladamente ou combinados com a subcobertura, em diversas alternativas de arranjos, somente para o modelo de referência (modelo 01). Para esta etapa, todas as demais variáveis são fixas, isolando-se somente o componente de cobertura e desconsiderando-se os demais aspectos, como as cargas internas e a ventilação natural. Os parâmetros de avaliação adotados para a comparação entre os sistemas foram a temperatura do ar interno - t<sub>bs</sub> (°C) e a carga térmica diária de resfriamento do ambiente (W). Esta última variável consiste na demanda do sistema de ar condicionado para manter o ambiente a determinada temperatura e umidade relativa do ar, pré-estabelecidos. Neste caso, ficou estabelecida a temperatura do ar interno de 22 °C e 60% de umidade relativa do ar. Sempre que as condições ambientais internas estejam a uma temperatura superior a esta, o software calcula a carga térmica necessária para removê-la do ambiente visando atender à condição estabelecida.

### 3.4.2. Etapa 02: Avaliação da influência da carga térmica interna, da ventilação natural e das dimensões do modelo

O objetivo foi avaliar a interferência das fontes internas de calor (ocupação de pessoas, iluminação e equipamentos), da ventilação natural e das dimensões do galpão no desempenho do sistema de cobertura, permitindo assim avaliar os modelos para uma situação mais próxima da realidade. Para isto, foram reavaliados os componentes cujos resultados apresentaram o melhor e pior desempenho na etapa anterior, comparando-os com a mesma situação, porém variando a carga interna, a proporção geométrica entre as vedações externas e a possibilidade de ventilação natural. Nesta etapa somente a temperatura do ar interno serviu de parâmetro de comparação. Quanto à ventilação, comparou-se o resultado do modelo 01 avaliado na etapa anterior, sem abertura das janelas, com o resultado do mesmo modelo, agora com a abertura das janelas e portas durante o dia. Em relação à geometria dos modelos, foram comparados os resultados do modelo 01 com os outros dois modelos definidos anteriormente, ambos apresentando o mesmo volume, porém, com áreas diferentes (proporções entre paredes e cobertura são diferentes). A comparação visa à avaliação de quanto a cobertura influencia na carga térmica interna, em relação à vedação vertical e o quanto esta contribuição é mais ou menos significativa, dependendo das dimensões do edifício. Já para a avaliação da carga interna foi definida uma carga menor ( $161,0 \text{ W/m}^2$ ) e outra mais elevada ( $270,5 \text{ W/m}^2$ ), considerando-se situações comuns de atividade comercial, em termos de iluminação, equipamentos e ocupação

### 3.4.3. Etapa 03: Avaliação das estratégias de atenuação da carga térmica

Visa avaliar o resfriamento evaporativo por meio de aspersão d'água sobre a cobertura e o controle solar por meio de sombreamento desta. Trata-se de uma avaliação exploratória, comparando-se as cargas térmicas diárias de resfriamento (W) e as temperaturas do ar interno – tbs ( $^{\circ}\text{C}$ ) das coberturas com melhor e pior desempenho térmico obtido nas etapas anteriores, primeiro sem as estratégias de resfriamento e, depois, com a aplicação das mesmas.

### 3.5. Metodologia adotada para avaliação do resfriamento evaporativo no Energy Plus

O programa *Energy Plus* não avalia o resfriamento evaporativo por aspersão de água. Então, definiu-se uma metodologia visando uma simplificação para o cálculo da redução da temperatura do ar interno - tbs ( $^{\circ}\text{C}$ ) e/ou carga térmica de resfriamento (W) por meio do resfriamento evaporativo, utilizando-se o *Energy plus*. Contudo, os dados de entrada fornecidos ao programa tiveram que ser previamente calculados pelo processo manual, utilizando-se equações matemáticas (Eq. 1, 2 e 3) conhecidas da Termodinâmica (SONNTAG; BORGNAKKE e WYLEN, 2003), conforme a descrição da metodologia de cálculo abaixo:

Considerando-se a seguinte equação:

$$Q_{\text{rad}} - Q_{\text{vap}} = Q_{\text{liq}} \quad (\text{Eq. 01})$$

Onde:

$Q_{\text{rad}}$  = a radiação solar global no plano horizontal (dado fornecido no arquivo climático da cidade), em  $\text{W/m}^2$

$Q_{\text{vap}}$  = calor perdido devido à vaporização da água (a ser calculado), em  $\text{W/m}^2$

$Q_{\text{liq}}$  = calor que atinge a superfície da cobertura (dado que se pretende encontrar), em  $\text{W/m}^2$

Baseando-se nos conhecimentos da Termodinâmica, têm-se que  $Q_{\text{vap}}$ :

$$Q_{\text{vap}} = m_{\text{H}_2\text{O}} \times h_{\text{lv}} \quad (\text{Eq. 02})$$

Onde:

$m_{\text{H}_2\text{O}}$  = fluxo de água por unidade de tempo, em  $\text{kg/s}$

$h_{\text{lv}}$  = entalpia de vaporização, em função da temperatura do ar, em  $\text{kJ/kg}$  (dado obtido na tabela termodinâmica, em: SONNTAG; BORGNAKKE e WYLEN, 2003)

O valor aproximado de fluxo de água em  $\text{litros/m}^2/\text{hora}$  foi obtido em pesquisa de campo (em empresa de resfriamento evaporativo), consiste em  $0,4 \text{ litros/m}^2/\text{hora}$ . É preciso converter volume ( $\text{m}^3$ ) em massa (kg):

$$m_{\text{H}_2\text{O}} (\text{kg/s}) = Q / (\text{m}^3/\text{h}) \times 1/3600 \times \rho_{\text{H}_2\text{O}} \quad (\text{Eq. 03})$$

Onde:

$\rho_{\text{H}_2\text{O}}$  = 1 / volume específico  $\text{H}_2\text{O}$

Utilizando-se estas equações e convertendo-se as variáveis necessárias, é possível encontrar o valor de  $Q_{liq}$ , ou seja, do calor que atinge a superfície da cobertura. A partir do valor encontrado de  $Q_{liq}$ , encontra-se um coeficiente proporcional ao valor de radiação global incidente no plano horizontal ( $Q_{rad}$ ). Ou seja, a radiação global ( $Q_{rad}$ ) representa a radiação que incidiria na cobertura sem a estratégia de aspersão de água, enquanto a radiação “líquida” ( $Q_{liq}$ ) representa a radiação resultante após o processo de evaporação da água aspergida. O dado de radiação ( $Q_{rad}$ ) pode ser ajustado no arquivo de entrada por meio de um fator de ajuste relacionado às condições de céu. Utilizando-se esta opção e outras ferramentas disponíveis no *Energy plus* foi possível encontrar o valor estimado de temperatura do ar interno ( $^{\circ}C$ ) e carga térmica (W). É importante lembrar que se trata de uma simplificação e não de um modelo preciso. Contudo, este método permite uma aproximação para se alcançar o resultado visado dentro das possibilidades oferecidas pelo programa.

## 4. ANÁLISE DE RESULTADOS

### 4.1. Análise da primeira etapa

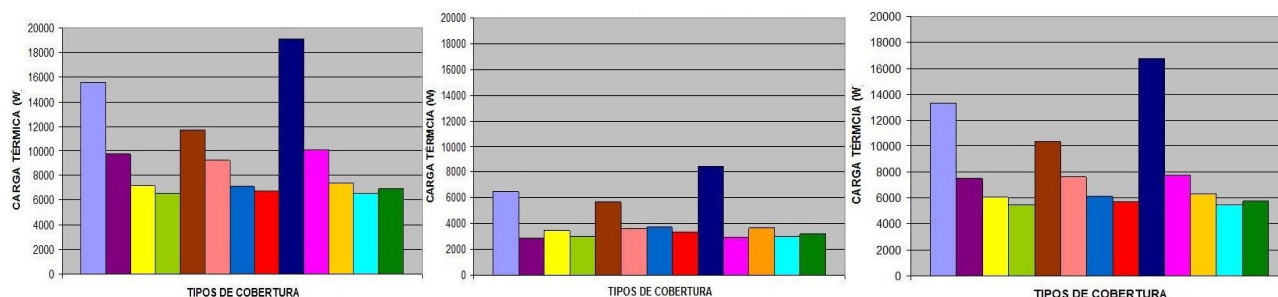


Figura 4, 5 e 6 – Carga térmica diária de resfriamento (W) para março (quente-úmido), julho (quente-seco) e outubro (situação extrema de calor), respectivamente

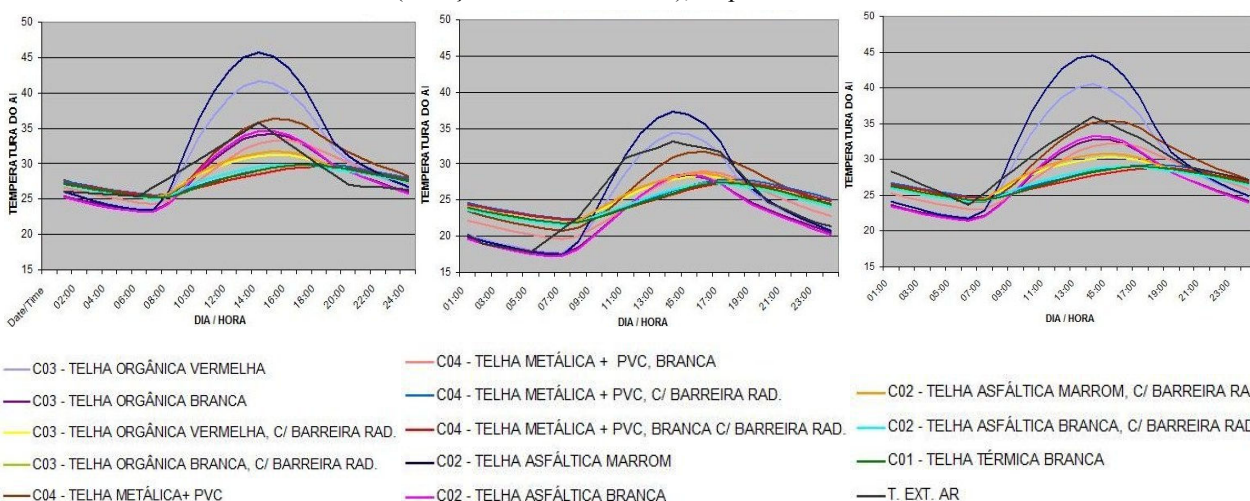


Figura 7, 8 e 9 – Temperatura do ar interno ( $^{\circ}C$ ) em março, julho e outubro, respectivamente

Como é de se esperar, as cargas térmicas são menores em julho, cujas temperaturas são mais amenas e a radiação solar é menor. Em outubro, apesar de ser o período mais quente do ano, a carga térmica de resfriamento é menor do que em março, devido à maior amplitude térmica diária e à umidade relativa do ar, (mais baixa nesta época), propiciando maiores perdas de calor e, conseqüentemente, noites mais amenas. Observa-se, conforme esperado, que a cor e o acabamento da superfície exposta são fatores determinantes para o desempenho térmico da envoltória. Percebe-se que em todos os tipos de telhas avaliados, aqueles cuja cor é branca resultaram em menores cargas térmicas de resfriamento e temperaturas internas mais baixas. Quanto mais escura, pior o desempenho da telha. Outro aspecto fundamental relacionado à superfície dos materiais é o tipo de acabamento: as coberturas dotadas de barreira radiante em seu sistema, ou seja, superfícies de alumínio polido (baixa emissividade), também demonstraram melhor desempenho térmico. Porém, o aspecto da emissividade, diferentemente da cor, não diz respeito à superfície externa da cobertura e sim a uma superfície interna protegida das intempéries e do acúmulo de poeira, capaz de reduzir a emissão de ondas longas.



Comparando-se a mesma telha, ora pintada de branco, ora com aplicação da barreira radiante, pode-se afirmar que esta última estratégia apresenta resultados mais satisfatórios, em se tratando da redução da temperatura do ar interno, principalmente para o período de março (quente e úmido) e outubro (mais quente).

Em julho, para as telhas escuras, a pintura branca e a aplicação da barreira radiante apresentam resultados semelhantes na redução da temperatura interna. Quando se aplica as duas estratégias combinadas percebe-se ainda uma melhora, porém discreta.

Quanto ao tipo de telha, analisando-se o comportamento das 04 (quatro) tipologias isoladamente, conclui-se que o sistema composto por uma telha metálica de chapa simples, com forro de PVC e camada de ar entre ambos, apresenta o melhor desempenho, seguido da telha isolante (com valores bastante aproximados à anterior) e por último a telha de fibras vegetais orgânicas e a telha asfáltica, que também apresentaram resultados semelhantes (quando na mesma cor). Conforme a opção de cor e o uso de barreira radiante, melhora-se o desempenho térmico proporcionalmente.

## 4.2. Análise da segunda etapa

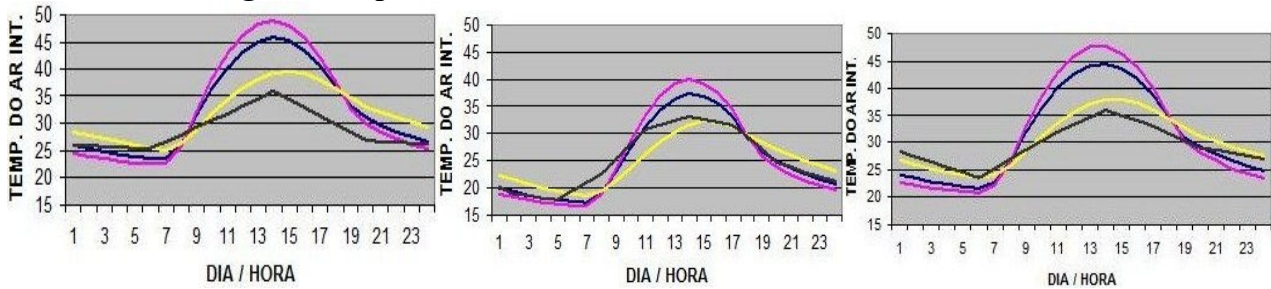


Figura 10, 11 e 12 – Temperatura do ar interno, para diferentes modelos geométricos, com a telha asfáltica marrom, em março, julho e outubro, respectivamente.

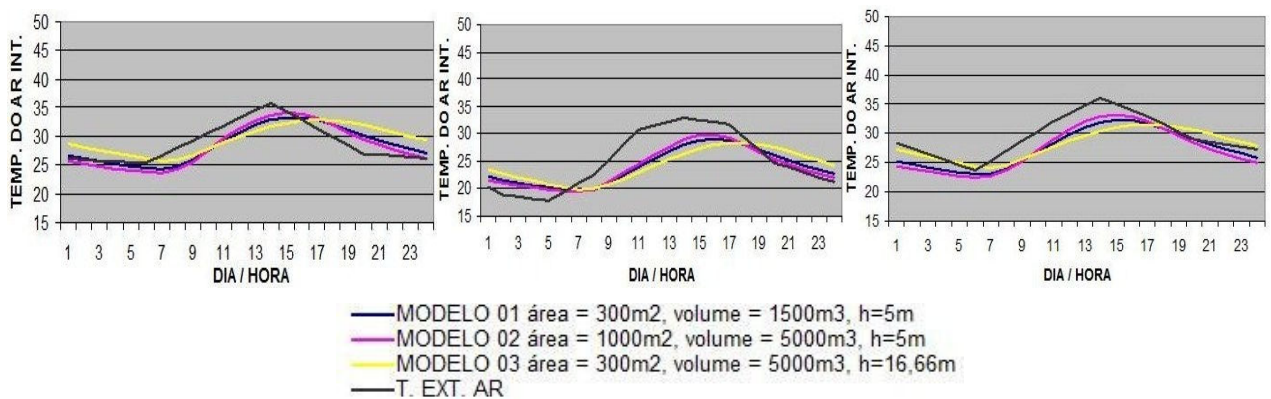


Figura 13, 14 e 15 - Temperatura do ar interno, para diferentes modelos geométricos, com a telha metálica branca com forro de PVC, em março, julho e outubro, respectivamente.

As simulações acima demonstraram que o modelo 02, cuja área de cobertura é significativamente maior que a do modelo 03, em todos os casos avaliados apresentou temperaturas do ar interno mais elevadas, comprovando o quanto a cobertura é responsável pelo desempenho térmico do edifício. As diferenças são mais notórias para a telha asfáltica marrom que apresenta um menor isolamento térmico e maior absorção de calor em relação à cobertura dotada de telha metálica, camada de ar e forro de PVC.

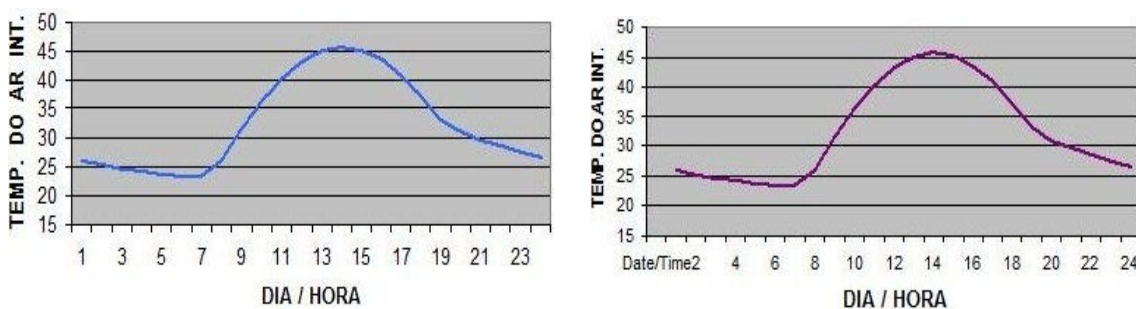


Figura 16 e 17 - Temperatura do ar interno com a telha asfáltica marrom, em março, para diferentes cargas térmicas internas e taxas de ventilação, respectivamente.

Os gráficos acima correspondem apenas ao mês de março e à telha asfáltica marrom, já que todas as outras simulações desta etapa apresentaram o mesmo resultado, ou seja, tanto a carga térmica interna quanto a ventilação natural não influenciaram na temperatura interna obtida. Em se tratando da carga interna, foi comprovado que a carga térmica proveniente da cobertura é significativamente maior que as cargas produzidas internamente por pessoas, equipamentos e iluminação. Já quanto à ventilação natural, a velocidade praticamente nula do ar (característica do clima local) não contribui para a ventilação natural por ação dos ventos, ocorrendo somente o efeito chaminé. Além disto, o dimensionamento e o posicionamento inadequados das aberturas, nesta tipologia de galpões, não favorecem o efeito da ventilação, justificando a indiferença nos resultados de temperatura do ar interno.

## 4.2. Análise da terceira etapa

### 4.2.1. Quanto ao resfriamento evaporativo

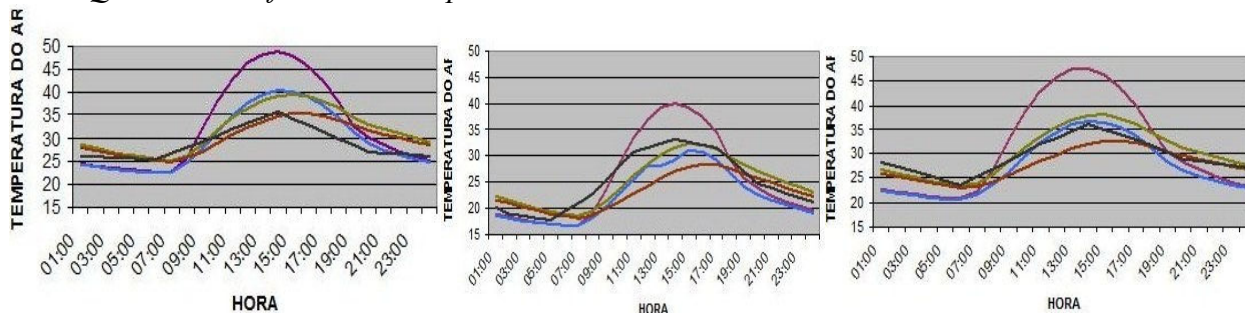


Figura 18, 19 e 20 - Temperatura do ar interno para o modelo 02, com a telha asfáltica marrom, com e sem resfriamento evaporativo, em março, julho e outubro, respectivamente.

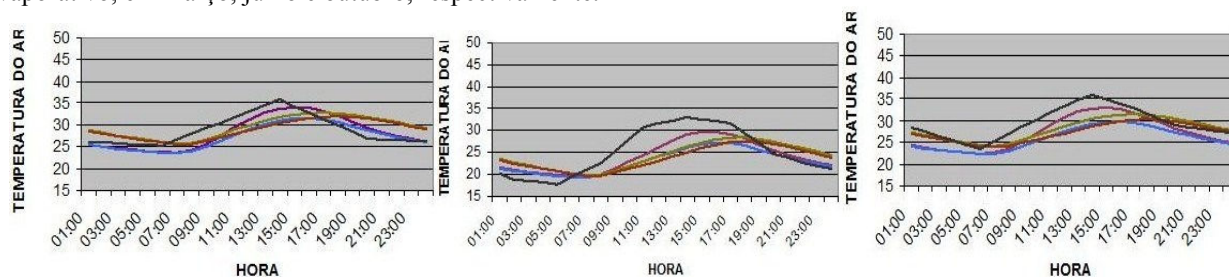


Figura 21, 22 e 23 - Temperatura do ar interno para o modelo 02, com a telha metálica simples com forro de pvc, com e sem resfriamento evaporativo, em março, julho e outubro, respectivamente.

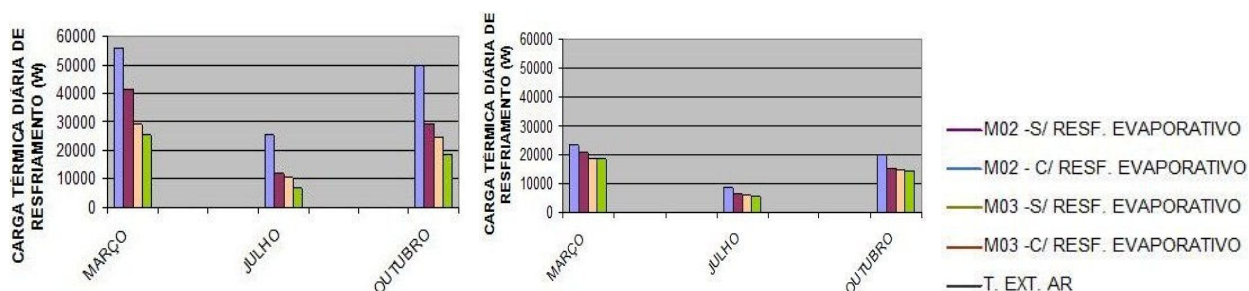


Figura 24 e 25 – Carga térmica diária de resfriamento (W) para o modelo 02, com e sem resfriamento evaporativo, com a telha asfáltica marrom e telha metálica branca com forro de pvc, respectivamente.

Percebe-se que a estratégia de resfriamento evaporativo é capaz de reduzir significativamente a carga térmica. Quanto maior a cobertura, maior o efeito de redução da carga térmica; Quanto pior o desempenho da cobertura, maior será a melhoria alcançada e quanto menor a umidade relativa do ar e mais elevada a temperatura do ar, maior a redução da carga térmica. As reduções inferiores alcançadas para o período úmido (março) comprovam isto.



#### 4.2.1. Quanto ao sombreamento.

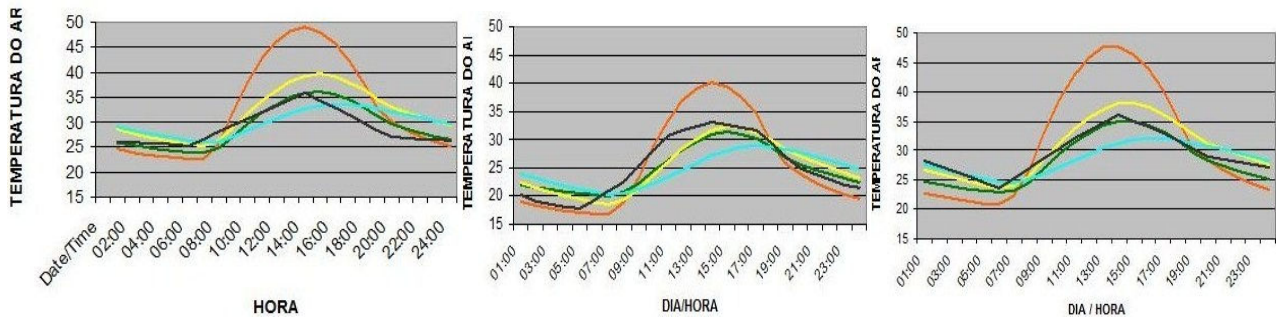


Figura 26, 27 e 28 - Temperatura do ar interno para o modelo 02, com a telha asfáltica marrom, com e sem sombreamento, em março, julho e outubro, respectivamente.

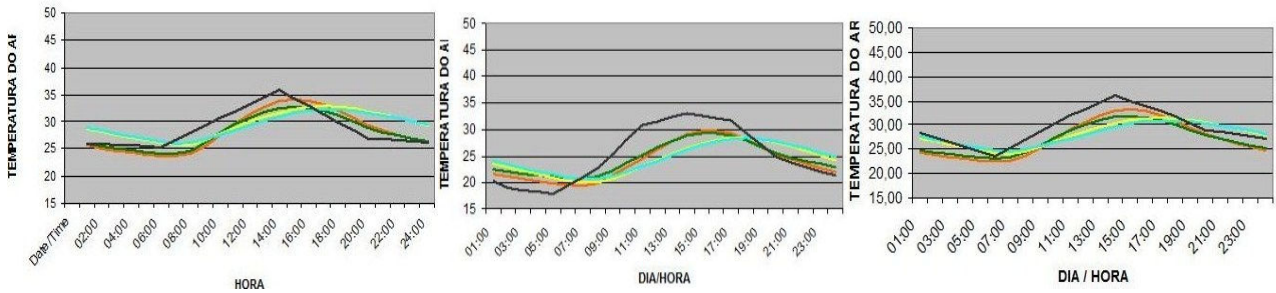


Figura 29, 30 e 31 - Temperatura do ar interno para o modelo 02, com a telha metálica simples com forro de pvc, com e sem sombreamento, em março, julho e outubro, respectivamente.

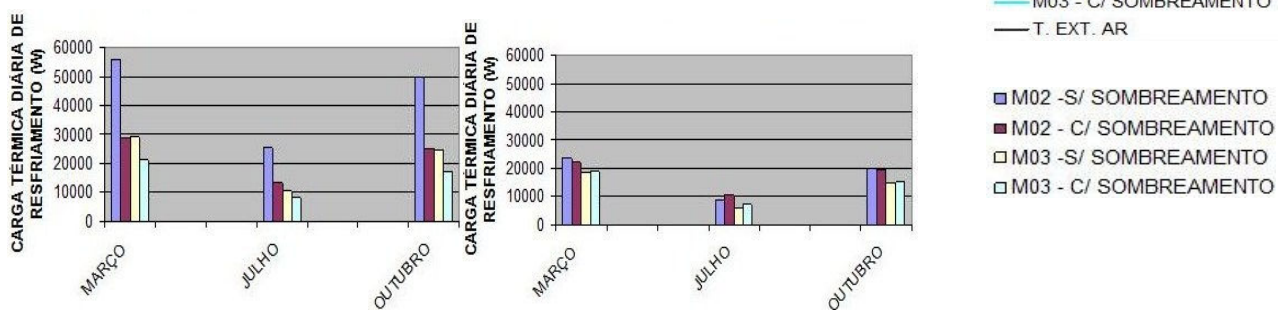


Figura 32 e 33 – Carga térmica diária de resfriamento (W) para o modelo 02, com e sem sombreamento, com a telha asfáltica marrom e telha metálica branca com forro de PVC, respectivamente.

Percebe-se que o sombreamento da cobertura também é uma estratégia eficiente para a redução da carga térmica e da temperatura do ar interno. Comparando-se com os resultados obtidos com o resfriamento evaporativo, nota-se que o sombreamento é capaz de reduzir ainda mais a carga térmica, porém depende das condições climáticas, principalmente da radiação solar e da umidade do ar. No período seco (julho), por exemplo, o resfriamento evaporativo demonstrou ser mais eficiente, ainda que sutilmente. Já no período quente e úmido (março), o sombreamento reduz significativamente mais a temperatura do ar interno. Sendo o M02 o modelo mais representativo das tipologias de galpões estudados nesta pesquisa, ou seja, edificações cuja cobertura é a principal fonte de calor, pode-se dizer, que para esta tipologia, o sombreamento demonstrou ser mais eficaz na redução da temperatura. Para a cobertura de telha térmica, nota-se um decréscimo muito discreto na temperatura interna do ambiente e na carga térmica de resfriamento. Assim como se observou nos resultados na primeira etapa da experiência, o sistema já é considerado de bom desempenho devido à cor branca da superfície e à camada de ar isolante entre a telha e o forro, havendo poucas possibilidades de melhorias. Para o M03 a redução é quase imperceptível. Ao contrário do resultado obtido para a telha asfáltica marrom, neste tipo de cobertura o resfriamento evaporativo alcançou resultados mais satisfatórios que o sombreamento, o que é de se esperar, já que a superfície externa é branca e, por isso, absorve menor quantidade de radiação solar que a telha marrom. Para finalizar a análise das estratégias passivas de atenuação da carga térmica em coberturas, foram comparadas as duas soluções que obtiveram melhorias mais significativas, na primeira e na terceira etapa: a aplicação de barreira radiante sob a telha e o sombreamento, comparando-se a redução da carga térmica de resfriamento (em porcentagem). Observou-se

que a aplicação da barreira radiante, quando corretamente utilizada, apresenta resultados mais notórios na redução da carga térmica que o sombreamento, conforme a tabela:

Tabela 1 – Comparação entre a redução da carga térmica de duas estratégias passivas: o uso de barreira radiante e o sombreamento

ESTRATÉGIA	REDUÇÃO DA CARGA TÉRMICA (%) -			
	março	julho	outubro	média
BARREIRA RADIANTE - 1ª. etapa (M01)	62%	58%	64%	61%
SOMBREAMENTO - 2ª. etapa (M02)	48%	48%	50%	49%

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados da primeira etapa demonstram que as telhas escuras apresentaram o pior desempenho térmico, ao contrário das brancas e daquelas dotadas de barreira radiante. A telha isolante e a metálica com forro de PVC apresentaram as menores cargas térmicas e temperaturas do ar interno. Concluiu-se que quanto pior o desempenho térmico da telha, maior o efeito de redução da carga térmica por meio de barreira radiante, e que esta subcobertura é capaz de reduzir mais a temperatura do ar interno que a pintura branca. Conclui-se ainda que todas as melhorias alcançadas nas telhas de baixo desempenho térmico as tornam semelhantes ao desempenho da telha térmica isolante e da telha metálica com forro de PVC.

Após a análise da segunda etapa concluiu-se que os resultados obtidos na primeira etapa não foram influenciados pela carga térmica interna e tampouco pela ventilação natural. Já quanto à geometria do modelo, pôde-se comprovar que há influências significativas na temperatura do ar interno e na carga térmica de resfriamento, sendo estes mais elevados quanto maior a área de cobertura em relação às vedações verticais.

Na terceira etapa, as duas estratégias passivas de atenuação da carga térmica proveniente da cobertura, o sombreamento e o resfriamento evaporativo, apresentaram resultados satisfatórios na redução da carga térmica, dependendo do tipo de telha e da época do ano, destacando-se o sombreamento, com reduções mais significativas no caso da cobertura de pior desempenho térmico. E ainda, se comparados os efeitos do uso de barreira radiante com o sombreamento da cobertura, percebe-se que a barreira radiante é capaz de reduzir mais significativamente a carga térmica diária de resfriamento (W) e a temperatura do ar interno (°C), demonstrando que esta estratégia passiva é um forte aliado para a melhoria do conforto térmico interno e para a redução do consumo de energia com climatização artificial.

## 6. REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220-2**: Desempenho térmico de edificações – Parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, 2005a.
- BEN – Balanço Energético Nacional. Disponível em: <ben.epe.gov.br>. Acesso em: 10 de Novembro de 2008
- DOE / USA - Departamento de Energia dos Estados: Energy Plus. Disponível em: <http://www.eere.energy.gov/buildings/energyplus>. Acesso em 11 set. de 2006.
- GIVONI, Baruch. **Passive and low energy cooling of buildings**. New York - USA: John Wiley, 1994.
- GUERRA, Macho José J. **Control Climático en espacios abiertos**: Evaluación del Proyecto EXPO'92. Sevilla: CIEMAT/Universidad de Sevilla, 1994.
- INCROPERA, Frank. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 5 ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 2003.
- MICHELS, Caren. **Análise da transferência de calor em coberturas com barreiras radiantes**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFSC, Florianópolis
- SANTAMOURIS, M.(ed). **Advances in Passive Cooling**. London: James & James, 2007.
- SONNTAG, Richard E.; BORGNAKKE, Claus; WYLEN, Gordon J. van. **Fundamentos da Termodinâmica**. Tradução Euryale de Jesus Zerbini. 6ª. Ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, 2003.
- VITTORINO, Fúlvio; SATO, N. M. N.; AKUTSU, Maria. Desempenho Térmico de Isolantes Refletivos e Barreiras Radiantes aplicados em Coberturas. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 7 e CONFERÊNCIA LATINO-AMERICANA SOBRE CONFORTO E DESEMPENHO ENERGÉTICO DE EDIFICAÇÕES, 3, 2003, Curitiba - PR. Anais... Curitiba: ANTAC, 2003. p. 1277-1284.
- YANNAS, Simos; ERELL, Evyater; MOLINA, José L. **Roof Cooling Techniques: A Design Handbook**. London: Earthscan, 2006.

## 7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo e à FAPEMAT - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Mato Grosso, pelos recursos financeiros disponibilizados para esta pesquisa. Também ao Prof. Dr. Alberto Hernandez Neto, do Departamento de Engenharia Mecânica da EPUSP, pelo auxílio na definição da metodologia de cálculo do resfriamento evaporativo e ajustes deste para o *Energy Plus*.