

Viabilidade econômica de mantas térmicas, produzidas a partir de resíduos de asfalto, para revestimento de telhados

Economic viability of a thermal blanket produced from asphalt waste used in roof covering

Mágilla Feitosa Medeiros¹, Marco Antonio Cortellazzi Franco², Rogério Bonette Klepa², José Carlos Curvelo Santana³

¹ Universidade Nove de Julho, Uninove, Programa de Pós-graduação em Cidades Inteligentes e Sustentáveis, Rua Deputado Salvador Julianelli, s/n – 1º andar, CEP: 01156-080, São Paulo, SP, Brasil.

² Universidade Nove de Julho, Uninove, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Produção, Rua Vergueiro, 235 – 12º andar, CEP 01504-001, São Paulo, SP, Brasil.

³ Departamento de Engenharia de Produção, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, Av. Prof. Luciano Gualberto, 1380 - Butantã, CEP: 05508-010, São Paulo, SP, Brasil.

e-mail: magilla.engenharia.civil@gmail.com, mafranco@uol.com.br, klepao@gmail.com, jccurvelo@yahoo.com.br

RESUMO

Este trabalho apresenta os resultados obtidos em um projeto de construção civil, no qual se dimensiona a isolamento térmica do telhado de uma pousada na região de São Joaquim, SC, considerada uma das regiões mais frias do Brasil. Propôs-se o uso de um isolante produzido à base de asfalto reciclado, apontando sua eficiência de isolamento térmica e viabilidade econômica com relação aos isolantes comumente usados pela construção civil brasileira. Os resultados obtidos demonstraram que a manta de asfalto reciclado reduz a perda de calor do telhado entre 68 e 72% e o seu custo com material é de duas a cinco vezes menor que as demais mantas estudadas. Além disso, o material do qual o produto é feito é mais ecológico do que as demais mantas térmicas. Assim, este projeto mostrou que o uso da manta de asfalto reciclado é viável economicamente, além de ser muito mais eficiente do que as mantas comercializadas atualmente no Brasil.

Palavras-chave: isolamento térmico, asfalto reciclado, eficiência, manta térmica, viabilidade econômica.

ABSTRACT

This work shows the results obtained in a civil construction project, in which the thermal insulation of an inn's roof is measured in São Joaquim, SC, which is considered to be one of the coldest regions in Brazil. It was proposed the use of an insulator produced with recycled asphalt, indicating its thermal insulation efficiency and economic viability in relation to the insulators commonly used by Brazilian civil construction. The results showed that the recycled asphalt blanket reduces the roof heat loss between 68 and 72% and its material cost is two to five times smaller in relation to the other blankets studied. In addition, the material from which the product is made is more environmentally friendly than other thermal blankets. Thus, this project showed that the recycled asphalt blanket use is economically viable, besides being much more efficient than the blankets currently commercialized in Brazil.

Keywords: thermal insulation, recycled asphalt, efficiency, thermal blanket, economic viability.

1. INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é uma das maiores geradoras de emprego no mundo; no entanto, é a maior geradora de resíduos sólidos que em sua maioria são destinados aos aterros sanitários, muitas vezes ilícitos. Atualmente, diversas medidas e estudos experimentais estão sendo realizados para sua redução, assim como sua aplicação em material cerâmico, descoberta por KLEPA et al. [1], com potenciais características, tanto para absorção quanto para reflexão de energia e excelente para refletir o calor. O resíduo da construção pode ser útil também como reuso na terraplanagem de estradas e na compactação de solos em diversos tipos de construções [2, 3].

De acordo com CAO et al. [4], HILÁRIO [5], LOPES et al. [6] e RODRÍGUES-FERNÁNDEZ et al. [7], a fresagem de pavimentos asfálticos é, nos dias atuais, uma das técnicas constantemente aplicadas no processo de manutenção e restauração do sistema rodoviário, como parte do processo de restauração de pavimentos deteriorados, em especial com o objetivo de solucionar problemas frequentemente encontrados, como a elevação do nível das estradas, além de atenuar a propagação de trincas e evitar a elevação dos dispositivos de drenagem, entre outros.

Mundialmente, existe uma grande preocupação de encontrar um destino ecologicamente correto para os resíduos gerados pela indústria da construção civil; com isso, as obras de engenharia passaram a adotar técnicas de reuso de materiais, visando diminuir os impactos ambientais. A fresagem de pavimentos destaca-se dentre as atividades que produzem grande quantidade de resíduos poluentes nas obras de manutenção. O material fresado, também chamado de concreto asfáltico, é composto por agregados e o ligante, conhecido também como Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP). O reaproveitamento dos resíduos provenientes das atividades de manutenção e restauração do sistema de manutenção do pavimento dos corredores segregados e viários estratégicos permite a conservação do meio ambiente [3, 4, 6, 7, 8].

Seguindo a NBR 7207:82 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o pavimento é uma estrutura construída após a terraplenagem e seu conjunto destinado econômica e simultaneamente a: resistir e distribuir ao subleito os esforços verticais produzidos pelo tráfego; melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e segurança; e resistir aos esforços horizontais que nele atuam, tornando mais durável a superfície de rolamento. Os pavimentos flexíveis, em geral associados aos pavimentos asfálticos, são compostos por camada superficial asfáltica sobre camadas de base, de sub-base e de reforço do subleito, constituídas por materiais granulares, solos ou misturas. Os pavimentos rígidos, em geral associados aos de concreto de cimento Portland, são compostos por uma camada superficial de concreto de cimento Portland (em geral placas, armadas ou não), apoiada geralmente sobre uma camada de material granular ou de material estabilizado com cimento [8].

As técnicas de reciclagem de pavimentos surgiram da preocupação mundial com a destinação ecologicamente correta dos resíduos gerados pelas atividades de manutenção rodoviária, visando à redução dos impactos ambientais [6, 7, 9, 10, 11]. Os principais objetivos da reciclagem de pavimentos são o reaproveitamento de materiais, a economia da utilização de recursos naturais e, se possível, a melhoria das propriedades físicas e mecânicas dos materiais [9, 11]. As técnicas de reaproveitamento podem ser aplicadas em qualquer camada do pavimento, podendo ser executadas no local de retirada do material ou em locais próximos, evitando os altos custos de transporte. Na reciclagem com incorporação de material, por exemplo, nas camadas da sub-base, na base e no revestimento de pavimentos flexíveis, podem ser utilizados diferentes materiais como o resíduo de construção e demolição (RCD), o resíduo sólido urbano (RSU) e o material fresado do revestimento.

Baseados nas necessidades de cada região, os projetos de isolamentos térmicos devem ser elaborados fazendo uma análise minuciosa das variações ambientais e dos materiais disponíveis, de forma a torná-los executáveis e viáveis economicamente.

O presente trabalho aborda a reutilização de material fresado da camada de pavimento de malhas viárias, ou seja, abordou-se o quanto é vantajoso a reutilização desse material, que muitas vezes é descartado na natureza, causando danos ambientais.

Desta forma, este trabalho mostra o resultado de um projeto de construção civil, no qual se dimensiona a isolamento térmica do telhado de uma pousada na região de São Joaquim, SC, considerada uma das regiões mais frias do Brasil. Propôs-se o uso de um isolante produzido à base de resíduo de asfalto, demonstrando-se a sua viabilidade econômica com relação aos isolantes comumente usados pela construção civil brasileira.

1.1 Isolação térmica de construções

De acordo com AL-HOMOUDET al. [12], os edifícios são grandes consumidores de energia em todos os países. Em regiões com condições climáticas adversas, uma parte substancial da energia é utilizada para aquecer e resfriar edifícios. Esta carga de aquecimento e ar condicionado pode ser reduzida através de muitos meios; notável entre eles é o design adequado e seleção de envelope de construção e seus componentes.

O isolamento em edifícios é considerado como uma técnica simples, mas altamente eficiente em termos energéticos, que pode ser aplicada ao setor residencial, comercial e industrial. O isolante térmico é

composto por um material ou materiais compostos que possuem a característica de alta resistência térmica, que exibe a capacidade de diminuir a taxa de fluxo de calor [12, 13].

Em geral, a composição do material de isolamento indica as características de isolamento que estão diretamente ligadas à sua estrutura química e física. Os isolantes térmicos podem ser classificados de acordo com as propriedades de troca de calor (isolamento em massa e isolamento refletivo), quanto a sua forma (espuma de spray, batas, cobertores e placa rígida) e de acordo com a sua composição química (orgânico, inorgânico e misto) [13].

O uso adequado de isolamento térmico em edifícios não contribui apenas para reduzir o tamanho do sistema de ar condicionado, mas também para reduzir o custo anual de energia. Além disso, ajuda a prolongar os períodos de conforto térmico sem depender do condicionamento de ar mecânico, especialmente durante os períodos intertemporais [12].

Assim, a busca por materiais isolantes mais eficientes tem sido intensificada nas últimas décadas. Como o isolante térmico desenvolvido por CHIÑAS-CASTILLO *et al.* [14] usando a fibra de coco em paredes de painéis de fibrocimento em configuração sanduíche para escolas e coberturas de casas em Puerto Escondido, Oaxaca, México. Os resultados mostraram que a condutividade térmica da configuração proposta foi de 0,221 W/m. K, sendo menor do que os materiais típicos usados para edifícios residenciais.

YEW *et al.* [15] desenvolveram um sistema de isolamento térmico usando latas de alumínio recicladas, dispostas na forma de tubos, revestidos superficialmente por espuma de poliuretano para o resfriamento de um sótão. A distribuição dos tubos permitia que eles atuassem como a cavidade de ar móvel. Os resultados mostraram a redução de 42,4 para 29°C, devido a distribuição dos materiais que compuseram o sistema de isolamento térmico ter uma baixa condutividade térmica (0,107 W/m. K).

YANG *et al.* [16] que investigaram numericamente e experimentalmente o desempenho térmico de mantas de aero gel na eficiência energética de edifícios, no inverno e verão chinês. Os resultados mostraram que a parede com manta de aero gel apresentou decréscimos de $\pm 20\%$ e $\pm 40\%$ na amplitude de flutuação da temperatura interna e do fluxo de calor, respectivamente, em comparação com as paredes isolantes tradicionais.

A magnitude da economia de energia resultante do uso do isolamento térmico varia de acordo com o tipo de construção, as condições climáticas nas quais o edifício está localizado, bem como o tipo de material isolante utilizado. A questão agora nas mentes de muitos proprietários de edifícios não é mais o isolamento, mas sim qual tipo, como e quanto [12, 13].

Para tanto, a necessidade de cálculos envolvendo a transferência de energia (calor) de um ambiente para outro é necessária para que se possa medir a eficiência térmica e econômica de projetos de conforto ambiental e ajudar na tomada de decisão sobre qual deva ser o mais viável.

1.2 Leis da transmissão de calor

Como qualquer análise significativa na engenharia requer uma resposta quantitativa, para se resolver os problemas de transmissão de calor devem se conhecidos os seus fenômenos e relações físicas que governam os vários mecanismos de transmissão de calor. A transferência de calor se dá pelos seguintes modos: condução, convecção e radiação [16].

1.2.1 Condução

Segundo KREITH [17], a condução é o processo pelo qual o calor flui de uma região de temperatura mais alta para outra de temperatura mais baixa, dentro de um meio (sólido, líquido ou gasoso) ou entre meios diferentes em contato direto. Nesse caso, a energia é transferida por meio de comunicação molecular direta, sem apreciável deslocamento de moléculas.

De acordo com a teoria cinética, a temperatura de um elemento de matéria é proporcional à energia cinética média de suas moléculas constituintes. Esta energia intrínseca de um elemento de matéria é chamada de energia interna. Quando as moléculas em uma região adquirem uma energia cinética média maior do que a das moléculas da região adjacente, as moléculas possuidoras de maior energia transmitirão parte dessa energia para as moléculas da região de temperatura mais baixa. Tal comportamento se manifesta por uma diferença de temperatura entre as regiões [17].

Segundo INCROPERA e DE WITT [16], o mecanismo da condução de calor está associado à transferência de calor efetuada no nível molecular, por transferência de energia sensível. As partículas

mais energéticas (quentes) transferem parte da sua energia vibracional, rotacional e translacional por contato com outras partículas menos energéticas (frias) que recebem essa energia. A lei fundamental que descreve a condução térmica foi proposta pelo cientista francês J. B. J. Fourier em 1822, sendo o resfriamento chamado de lei de Fourier [16, 17]. Esta lei diz que o calor transferido por unidade de tempo, ou a velocidade de transferência de calor (q_k) na direção x é proporcional à área de transferência perpendicular ao fluxo de calor (A) e ao gradiente de temperaturas (dT/dx), como mostrado na Equação 1 [16, 17].

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

Onde k é a condutividade térmica (W/m. K). Considerando-se que o calor flui em regime permanente sobre uma placa plana, a integração da Equação 1 da temperatura quente em $x = 0$ até à temperatura fria em $x = L$ nos permitirá chegar até à equação da transferência de calor por condução, dada pelas Equações 2.a e 2.b:

$$\frac{q_k}{A} \int_0^L dx = - \int_{T_{\text{quente}}}^{T_{\text{frio}}} k dT$$

$$q_k = \frac{kA(T_{\text{quente}} - T_{\text{fria}})}{L} = \frac{kA\Delta T}{L} \quad (2.a)$$

Ou simplesmente:

$$q_k = \frac{\Delta T}{R_k} \quad (2.b)$$

Sendo que R_k é a resistência térmica (K/W), dada pela Equação 3.

$$R_k = \frac{L}{kA} \quad (3)$$

Similar a resistência elétrica, a resistência térmica permite as associações dos sistemas térmicos em série e em paralelo, seguindo a mesma analogia. As resistências equivalentes são dadas por:

Resistência equivalente da associação em série segue a Equação 4.

$$R_{\text{eq}} = R_1 + R_2 + R_3 + \dots + R_n \quad (4)$$

Resistência equivalente da associação em paralelo segue a Equação 5.

$$\frac{1}{R_{\text{eq}}} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n} \quad (5)$$

1.2.2 Convecção

A convecção é um processo de transferência de calor pela ação combinada da condução de calor, do armazenamento de energia e do movimento de mistura. É o principal mecanismo de transferência de energia entre uma superfície sólida e um líquido ou um gás.

Inicialmente, a energia é transferida por condução da superfície quente para as partículas do fluido em contato com a superfície. Esta energia aumentará a temperatura e a energia interna das partículas do fluido, fazendo com que elas se movam para a região mais fria. Neste movimento haverá a troca de calor com as partículas mais frias, havendo, então, transferência de calor e de massa ao mesmo tempo [16, 17].

Esse mecanismo é facilmente observado no aquecimento da água, onde o calor passa do fundo do recipiente metálico para o líquido que, ao aumentar a sua temperatura, reduz a sua massa específica, deslocando-se por empuxo para a superfície. Também se observa a convecção pelo movimento do ar aquecido pelo asfalto quente, gerando a ilusão de ótica de que existe uma poça d'água sobre o asfalto [18].

De acordo com KREITH[17], o calor transmitido por convecção, por unidade de tempo, entre uma superfície e um fluido pode ser calculado pela Equação 6.

$$q_c = h_c A \Delta T \quad (6)$$

Onde: hc é o coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2 \cdot K$).

A resistência térmica devido a convecção é dada pela Equação 7.

$$R_{eq} = \frac{1}{h_c A} \quad (7)$$

1.2.3 Radiação

A radiação ou irradiação é o processo pelo qual o calor é transmitido de um corpo com alta temperatura para um com baixa temperatura, estando os corpos separados pelo espaço, mesmo que exista um vácuo entre eles.

O termo radiação é aplicado a todas as espécies de fenômenos de ondas eletromagnéticas. Entretanto, são de interesse dos estudos de transmissão de calor apenas os fenômenos que resultam na diferença de temperatura e que transportam energia através de meios transparentes e, neste caso, a energia é chamada de calor radiante [16, 17].

Para este caso, a quantidade de energia que deixa a superfície com calor radiante depende da temperatura absoluta e da natureza da superfície. A Equação 8, que relaciona a energia radiante com estas variáveis, foi descoberta, experimentalmente, por J. Stefan (1879) e, teoricamente, por L. Boltzmann (1884), ambos austríacos [17, 19].

$$q_r = \sigma \varepsilon A \Delta T^4 \quad (8)$$

Onde “ σ ” é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,6703 \cdot 10^{-8} W/m^2 \cdot K$) e “ ε ” a emissividade da superfície. A emissividade varia de 0 a 1, sendo máxima para os corpos negros, ou irradiador perfeito [18].

O calor radiante é transmitido através de impulsos, ou pela quantidade de energia e se propaga de forma semelhante à luz, podendo ser descrito pela teoria das ondas. Por isso, a energia radiante viaja na velocidade da luz (3×10^8 m/s), diferenciando-se apenas no comprimento de onda. Tal relação é conhecida como a lei do deslocamento de Wien, dada pela Equação 9, que proporciona a identificação da temperatura de um corpo pela medição do comprimento de onda das suas emissões. Tal relação é usada para medir a temperatura de corpos celestes ou a detecção de tumores cancerígenos em seres humanos, entre outras aplicações [18].

$$\lambda_{max} = \frac{3,898 mm \cdot K}{T} \quad (9)$$

Na maioria dos sistemas térmicos a transferência de calor ocorre por mecanismos combinados. Em paredes de fornos, por exemplo, há a radiação emitida pelos gases internos em combustão, seguida da convecção entre os gases próximos à primeira camada interna da parede do forno, para depois haver condução entre as camadas de material sólido que compõem a parede do forno e por fim, a convecção dos gases que se encontram próximos à última camada da parede externa, como mostrado na Figura 1 [9].

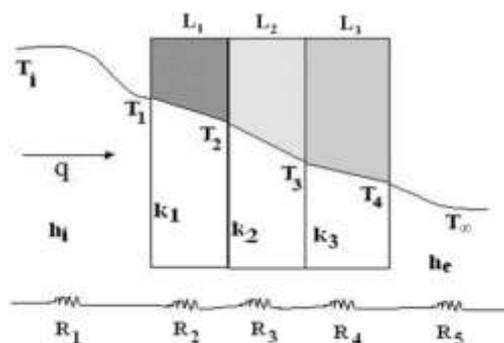


Figura 1: Esquema usado para a análise do fluxo de calor em uma parede plana (Adaptado de [17]).

Nesta figura, h_i e h_e são os coeficientes de transferência de calor por convecção do fluido interno e externo, respectivamente. Já L , k e T são o comprimento, a condutividade térmica e a temperatura de cada elemento que compõe a parede. As resistências de cada unidade transmissora de calor estão escritas abaixo da parede e correspondem às análises realizadas individualmente.

Como o sistema está em série e considerando-se que o fluxo de calor está em regime permanente, desenvolvendo as equações de transferência de calor para cada unidade transmissora do sistema mostrado na Fig.1, chega-se à Equação 10, que é a equação global de fluxo de calor por unidade de área em uma placa plana.

$$\frac{q}{A} = h_i(T_{\text{quente}} - T_1) = \frac{k_1(T_1 - T_2)}{L_1} = \frac{k_2(T_2 - T_3)}{L_2} = \frac{k_3(T_3 - T_4)}{L_3} = h_e(T_4 - T_\infty)$$

$$\frac{q}{A} = \frac{T_i - T_\infty}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5} \tag{10}$$

2. MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizada uma busca bibliográfica sobre o tema em bases exclusivamente brasileiras, para se obter às metodologias de isolamento aplicadas no Brasil e nos sites das empresas fornecedoras dos isolantes térmicos nacionais, das quais foram selecionadas as duas mais usadas e que, pelo preço e espessura, poderiam render um baixo custo e uma fornecedora internacional (especificamente a empresa do isolamento usado neste trabalho). Para o desenvolvimento dos cálculos do fluxo de calor, foi considerado que o telhado apresenta uma distribuição de temperaturas em uma parede plana composta e que flui sob regime permanente, seguindo uma analogia apresentada na Fig. 2.

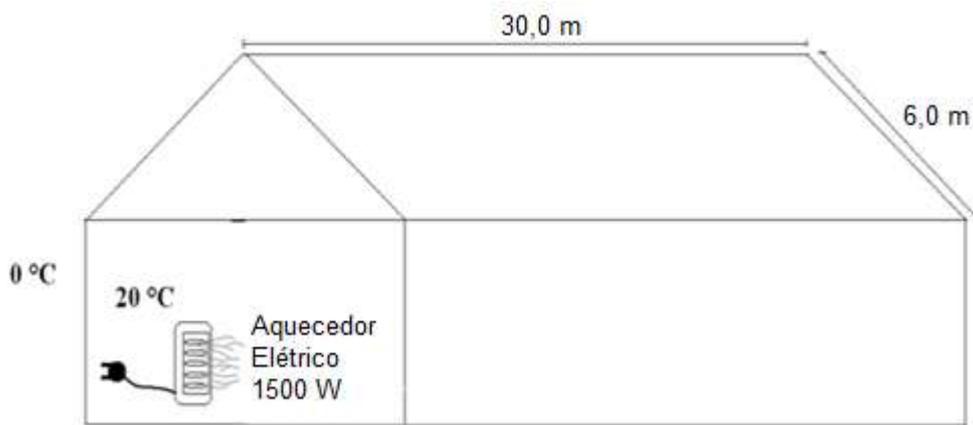


Figura 2: Esquema do telhado e distribuição das temperaturas na pousada.

O coeficiente de transferência de calor por convecção varia com a temperatura do meio e com a velocidade. Como no caso deste estudo o meio é o ar, então, admitindo que o fluxo de calor seja uniforme ao longo da placa plana, pode-se obter o coeficiente de transferência de calor por convecção usando as relações dos seguintes números adimensionais [19]:

$$Nu = \frac{h}{Lk} = 0,453Re_L^{0,5}Pr^{0,333} \tag{11}$$

$$Re = \frac{VL\rho}{\mu} e Pr = \frac{c_p \mu}{k}$$

Onde Nu é o número de Nusselt, Re é o número de Reynolds e Pr é o número de Prandtl.

Em seguida, as equações de resistências térmicas devido à convecção (Equação 7) e à condução (Equação 3) no material foram empregadas e seus valores foram substituídos na equação global (Equação

ção 10) da transferência de calor [19].

2.1 Propostas de isolamento térmico

O projeto analisou o uso de um conjunto composto por uma polegada (2,54 cm) de espessura de telhado de madeira de pinho e camadas de mantas térmicas comerciais. Duas mantas comercializadas no Brasil e uma manta americana foram escolhidas, como mostradas na Tabela 1.

Tabela 1: Dados das mantas térmicas usadas nos cálculos deste trabalho.

	Armacell®	Fibrocimento	SuperTuff®
Material	Polietileno	Fibrocimento e ligas metálicas	Poliisocianureto reciclado
Dimensões (m x m)	1x10	1x50	1,22 x 2,44
Espessura (mm)	10,0	0,125	50,8
Fornecedor	Leroy Merlin	Telha e Cia	Chelsea New York
Custo por (R\$/m ²)	230,00	170,00	4,99

A configuração dos telhados simulados nesta pesquisa foi a seguinte:

- Proposta 1: telhado composto por tábuas de pinho e 2 camadas de cobertor térmico-acústico, que é a manta isolante produzida pela Armacell®, como citado no site da Leroy Merlin [20]. Não há especificações de faixa de redução de temperatura. Como esta manta já é comumente usada nos isolamentos, com uma camada em cima e outra embaixo do telhado de madeira, para efeito de cálculo foram usadas 2 camadas de manta, totalizando 20,00 mm. O pacote contendo uma manta nas especificações da Tabela 1 é vendido a R\$ 230.

- Proposta 2: telhado composto por tábuas de pinho e 3 camadas de manta de fibrocimento. Esta manta é feita à base de fibrocimento com ligas metálicas (galvanizada ou zinco), possuindo uma vida útil de 10 a 15 anos aproximadamente, refletividade de 99% e redução de temperatura de 7 a 9°C e 100% impermeável. O pacote com um rolo, nas medidas especificadas, custa R\$ 170,00, sendo fornecido pela Telhas e Cia [21]. Pela variação de temperatura usada neste trabalho (20 °C), a quantidade de camadas para esta manta deve ser igual a 3, totalizando 0,375 mm. O pacote contendo uma manta nas especificações da Tabela 1 é vendido a R\$ 170.

- Proposta 3: telhado composto por tábuas de pinho e 1 camada de manta de asfalto reciclado. Esta manta tem formato de placa plana, usadas como telhas nos Estados Unidos. É comercializada pela Chelsea New York e sua faixa de operação vai de -45,6 °C a 87,8 °C, com redução de 6,5° por polegada [22]. O pacote contendo 21 mantas nas especificações da Tabela 1 é vendido a R\$ 311,85. A Fig. 3 apresenta um corte longitudinal da distribuição das camadas que compõem o telhado.

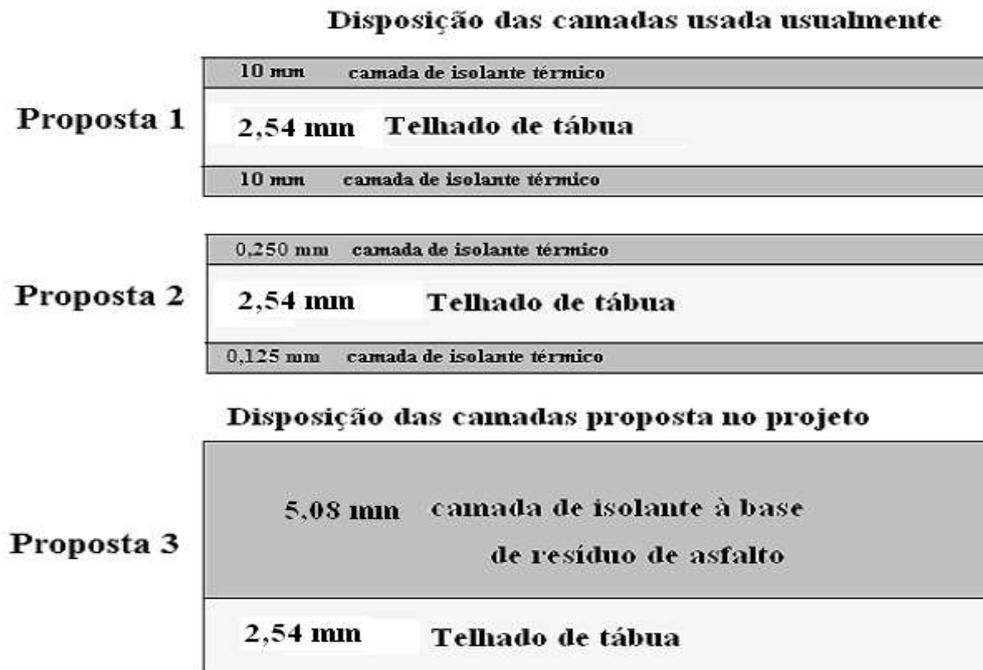


Figura 3: Esquema de montagem das mantas térmicas sobre o telhado de tábuas.

2.2 Cálculo de custos

Para os custos com o material isolante, fez-se inicialmente uma pesquisa de preço por pacote de cada isolante em dois dos principais vendedores brasileiros (Telhado & Cia e Leroy Merlin) e no vendedor americano (Chelsea New York Lowe's). Então, com base na área do telhado e na espessura total das camadas de cada material, estimou-se a quantidade de pacotes necessários para suprir a cobertura do telhado e, com uma simples multiplicação, chegou-se ao custo do material. Assumiu-se que os custos com transportes serão os mesmos para ambas as mantas térmicas.

Os custos com energia foram baseados na necessidade de reposição do calor perdido. Foi considerado que os equipamentos elétricos usados (aquecedores elétricos de 1500 W) possuem uma conversão de 100% de energia elétrica em calor (o que não é verdadeiro, mas também não é relatado nas etiquetas dos produtos). De posse do preço da energia comercializada no Brasil e divulgada pela ANEEL [23], fez-se uma simples multiplicação, chegando-se ao seu valor.

Considerou-se como o retorno financeiro (payback) a redução dos custos com energia devido ao uso do sistema de isolamento com a manta de asfalto reciclado, considerando o que já seria gasto ao se usar os sistemas de isolamento térmicos atuais (brasileiros). É calculado pela Equação 12[1,3]:

$$\text{Payback} = \frac{\text{custo da manta de asfalto reciclado } (\text{R}\$/\text{m}^2)}{\text{custo de energia isolante } (\text{R}\$/\text{m}^2) - \text{custo de energia manta asfáltica } (\text{R}\$/\text{m}^2)} \quad (12)$$

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Considerando-se um dia calmo, com velocidade do ar de 1,0 km/h, pressão atmosférica normal, temperatura externa de 0°C, temperatura dentro da pousada de 20°C e o ar estagnado fluindo a 0,2 km/h pelas frestas das janelas, portas, etc. As condições ambientais simuladas nesta pesquisa foram obtidas no site Weatherpark [24] para a região de São Joaquim – SC, usando os valores históricos médios para os meses de maio a julho, algumas propriedades do ar são apresentadas pela Tabela 2[17].

Tabela 2: Dados das propriedades do ar nas condições de estudo [17]

T (°C)	T (K)	ρ (kg/m ³)	μ (N.s/m ²)	k (W/m.K)	Pr
25	298	1,1707	0,00001836	26,14	0,7008
0	273	1,2874	0,00001711	24,14	0,7108

Considerando que a espessura da camada limite de ar que sofre influência da transferência de calor sem convecção forçada seja de 1,00 m, pode-se obter os coeficientes de convecção do ar das camadas de ar interna h_i e externa h_e , usando os dados da Tabela 2 combinados na Equação 11. O resumo dos resultados está apresentado na Tabela 3.

Tabela 3: Obtenção dos coeficientes de convecção do ar para as condições de estudo.

T (°C)	L (m)	v_{ar} (km/h)	Re	h (W/m ² . K)
25	1,000	0,200	3.188,27	22,723
0	1,000	1,000	20.917,14	58,476

A Tabela 4 apresenta um resumo do cálculo das resistências térmicas devido à convecção do ar interno e externo com o telhado da pousada, onde: A é a área de troca de calor, h é o coeficiente de convecção e R_c é a resistência térmica. Nota-se que a resistência do ar interno é menor do que a do ar externo. Estes cálculos foram feitos usando a Equação 7, conforme o exemplo abaixo:

$$R_{ar\text{interno}} = \frac{1}{22,723} = 1,2225 \cdot 10^4 \text{ K/W}$$

Tabela 4:Resumo dos cálculos das resistências térmicas por convecção.

Meio	A (m ²)	h (W/m ² . K)	R_c (K/W)
Ar interno	360	22,723	$1,2225 \cdot 10^{-4}$
Ar externo	360	58,476	$4,7503 \cdot 10^{-5}$

A Tabela 5 apresenta um resumo do cálculo das resistências térmicas devido à condução em cada material utilizado para a composição do telhado da pousada, onde: k condutividade térmica do material e R_k sua resistência térmica. Devido a sua menor condutividade térmica, a manta asfáltica apresentou a menor resistência térmica dentre os materiais que compõem o telhado. Embora menos eficiente que a manta asfalto reciclado, a manta de fibrocimento misturada com fibras de coco, apresentada por CHIÑAS-CASTILLO *et al.* [14], com um $k = 0,221$ W/m.K, demonstrou ser melhor que a fibrocimento comercial e que o cobertor termo acústico apresentados na Tabela 5, corroborando com a reciclagem de alguns materiais para a obtenção de mantas térmicas.

De acordo com ADITYA *et al.* [13], a manta de asfalto reciclado é um isolante térmico, pois possui a característica de alta resistência térmica, exibindo a capacidade de diminuir a taxa de fluxo de calor. Como resultado, o isolamento do edifício é capaz de manter o calor / frio dentro da casa e evitar o fluxo de calor com o ambiente.

Um exemplo destes cálculos é mostrado abaixo, pela simples substituição dos valores da Tabela 4 na Equação 4. Observando-se os dados desta tabela, percebe-se que a maior dentre as resistências é devida ao uso da camada de manta de asfalto reciclado. A manta de fibrocimento foi a que apresentou pior resistência dentre os materiais estudados.

$$R_{kasfalto} = \frac{0,0508}{0,0775 * 360} = 1,8208 \cdot 10^{-3} \text{ K/W}$$

Tabela 5: Resumo do cálculo das resistências térmicas por condução dos materiais.

Material	A (m ²)	L (m)	k (W/m. K)	R _k (K/W)
Manta de asfalto reciclado	360	0,0508	0,0775 ^a	1,8208.10 ⁻³
Tábuas de pinho	360	0,0254	0,1370 ^b	5,1500.10 ⁻⁴
Cobertor térmico acústico	360	0,0200	0,4930 ^a	1,1269.10 ⁻⁴
Manta de fibrocimento	360	3,75.10 ⁻⁴	0,2470 ^a	4,2173.10 ⁻⁶

a = dados dos fornecedores; b = dados obtidos em [17]

Assim, para os cálculos da troca de calor no telhado da pousada, fizeram-se as seguintes proposições:

1: telhado composto por tábuas de pinho e 2 camadas de cobertor termo acústico. Usando-se a Equação 10, obteve-se o fluxo de calor do interior para o exterior da pousada, que foi igual a 25.080,23 W. E, desta forma, há uma perda de calor para o meio ambiente elevada, sendo necessários 17 aquecedores de 1500 W (como mostrado na Figura 2) e, conseqüentemente, a pousada terá um gasto elevado com energia elétrica. Entretanto, esta proposta tem uma redução na perda de calor de 13% com relação à proposição seguinte.

$$q = \frac{20}{1,2225 \cdot 10^{-4} + 5,15 \cdot 10^{-4} + 1,1269 \cdot 10^{-4} + 4,7503 \cdot 10^{-5}} = 25080,23W$$

2: telhado composto por tábuas de pinho e 3 camadas de manta de fibrocimento. O cálculo do calor perdido para o ambiente exterior seguiu o procedimento mostrado na primeira proposição e o valor encontrado foi de 29.028,86 W, o que correspondeu à pior situação de perda de calor dentre as propostas de telhado. Para este caso, seriam necessários 20 aquecedores de 1500 W para suprimir a perda de calor e manter a temperatura ambiente em 20 °C.

3: telhado composto por tábuas de pinho e 1 camada de manta de asfalto reciclado. Usando os mesmos procedimentos de cálculos anteriores, chegou-se à uma perda de calor para este sistema igual a 7.982,31 W, sendo a menor dentre todos os sistemas propostos. Ao compará-lo com os demais sistemas, o sistema térmico proposto neste projeto foi de 68 a 72% mais eficiente que os demais e apenas 6 aquecedores de 1500 W já seriam suficientes para suprir a necessidade de reposição do calor perdido para o meio ambiente.

A Tabela 6 apresenta um sumário de todos os cálculos de fluxo de calor para os sistemas térmicos propostos a seguir. Lembrando que, de acordo com a Figura 2, a variação de temperatura para todos os sistemas de troca de calor é de 20 °C ($\Delta T = 20 - 0$) e que em todos os cálculos serão inseridas as resistências devido à convecção do ar e devido à condução da tábua de pinho.

Tabela 6: Resultados dos de fluxo de calor perdido para os sistemas térmicos estudados.

Proposta	Calor dissipado (W)	Redução da perdede Calor (W)	Redução (%)
1 – com cobertor termoacústico	25.080,23	17.097,92	68,17% comparando 3com 1
2 – com manta de fibrocimento	29.028,86	21.046,56	72,50% comparando 3com 2
3 – com manta de asfalto reciclado	7.982,31		

Na Tabela 7 nota-se que a manta proposta neste trabalho (proposta 3), embora tenha uma área de cobertura individual menor do que as demais, compensa pela quantidade de placas que cada pacote possui, pois, a área total acaba sendo próxima dos 60 m²/pacote e, desta forma, a quantidade de pacotes a ser adquirida é menor. Além disso, como é uma manta mais espessa, apenas uma camada foi necessária. Assim, com um custo total de R\$ 1.871,10, o valor da cobertura usando-se a manta de asfalto reciclado (Super-Tuff-R) [22] é de duas a cinco vezes menor do que usando-se os produtos comercializados no Brasil.

Tabela 7: Custo dos isolamentos apresentados neste estudo (área total = 360 m²)

Proposta	Nº de camadas no telhado	Espessura (mm)	Área damanta (m ²)	Quantidade de pacote	Quantidade de pacotes	Preço unitário	Custo
1	3	0,125	50,00	1	8	170	4.080,00
2	2	10	10,00	1	36	130	9.360,00
3	1	50,8	2,973	21	6	311,85	1.871,10

A Tabela 8 apresenta um resumo dos custos associados ao aquecimento interno do ambiente da pousada, devido à necessidade de reposição do calor, considerando-se que serão usados aquecedores elétricos. Como a menor perda de energia foi apresentada pela proposta 3 (usando isolamento com manta de asfalto reciclado), proposta defendida neste projeto, era de se esperar que os custos com a reposição da energia perdida seriam menores para esta proposta e, logicamente, seriam maiores para a proposta 2.

Mas, conforme observado, mesmo comparando-a com a melhor proposta dentre as encontradas no mercado brasileiro (proposta 1), a redução dos gastos com energia elétrica é de 4.097,58 R\$/mês, ou seja, além da manta de asfalto reciclado ser a proposta mais barata dentre as estudadas, ela ainda reduz consideravelmente os custos que a pousada terá com energia elétrica. Além disso, o sistema de isolamento térmico do telhado da pousada, usando a proposta 3 (com manta de asfalto reciclado), se paga em menos de um mês (*payback* entre 9,3 e 11,4 dias).

Tabela 8: Custos com a reposição do calor usando aquecedores elétricos.

Proposta	Preço energia (R\$/kW.h)	Potência dissipada (kW.h)	Custo com Energia (R\$/mês)	<i>Payback</i> (meses)
1	0,39865	25,080	7.198,73	0,381
2		29,029	8.332,10	0,301
3		07,982	2.291,15	

O custo do telhado obtido neste trabalho é muito menor do que o apresentado por YANG *et al.* [15], que usou aerogel em simulações de isolamento térmico de paredes a um custo de 500 €/m². (2150 R\$/m²).

Mesmo nos períodos quente da região (23-25°C), caso necessário o uso de ar condicionado, se a diferença entre a temperatura externa e interna tiver dentro da diferença de temperatura apresentada na Fig. 1, o sistema térmico funcionará e não permitindo que a temperatura interna de eleve e reduzindo o consumo de energia do ar condicionado, pois a alta resistência térmica da manta de asfalto reciclado permite a manutenção da temperatura ambiente [12, 13]. Além disso, a reciclagem do material fresado para a obtenção das mantas térmicas contribui com a redução dos descartes deste rejeito em aterros sanitários, sendo mais uma opção ecologicamente correta de reaproveitá-lo.

4. CONCLUSÕES

A manta térmica de asfalto reciclado, proposta neste artigo, reduz a perda de calor do telhado entre 68 e 72% e o seu custo com material é de duas a cinco vezes menor em relação às demais mantas estudadas. Desta forma, pode-se considerar esta manta térmica de asfalto reciclado um produto ecologicamente correto. Assim, este projeto demonstrou que o uso da manta de asfalto reciclado é viável economicamente, além de ser muito mais eficiente que as mantas comercializadas atualmente no Brasil.

Pode-se ainda sugerir sua aplicação voltada para redução de custos com energia elétrica, através da diminuição do uso de ar condicionados.

E, além demonstrar como tornar mais viável as isolações térmicas para a região de São Joaquim, SC, também podem ser abertos precedentes para a implantação de um possível mercado de comercialização desta manta térmica ecologicamente correta em todo o Brasil.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] KLEPA, R. B., MEDEIROS, M. F., FRANCO, M. A. C., *et al.*, Reuse of construction waste to produce thermoluminescent sensor for use in highway traffic control, *Journal of Cleaner Production*, v.209, pp. 250-258, 2019.
- [2] FAKIR, M., AHMADI, A. “Recycling of RAP and steel slag aggregates into the warm mix asphalt: A performance evaluation”, *Construction and Building Materials*, v. 147, pp. 630-638, 2017.
- [3] PASSARINI K. C., PEREIRA M. A., FARIAS T. M. B., *et al.*, “Assessment of the viability and sustainability of an integrated waste management system for the city of Campinas (Brazil), by means of ecological cost accounting”, *Journal of Cleaner Production*, v. 65, pp. 479-488, 2014.
- [4] CAO, R., LENG, Z., HSU, S.-C. “Comparative eco-efficiency analysis on asphalt pavement rehabilitation alternatives: Hot in-place recycling and milling-and-filling”, *Journal of Cleaner Production*; v. 210, pp. 1385-1395, 2019.
- [5] HILÁRIO, R. Q., “Uso de pavimento reciclado adicionado com cimento para uso como reforço de base para rodovias – estudo de caso: BR-120”, Dissertação de M. Sc., Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG, 2016.
- [6] LÓPEZ, C., GONZÁLEZ, A., THENOUX, G., *et al.*, “Stabilized emulsions to produce warm asphalt mixtures with reclaimed asphalt pavements”, *Journal of Cleaner Production*, v.209, pp.1461-1472, 2019.
- [7] RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, I., LASTRA-GONZÁLEZ, P., INDACOECHEA-VEGA, I., *et al.*, “Recyclability potential of asphalt mixes containing reclaimed asphalt pavement and industrial by-products”, *Construction and Building Materials*, v.195, pp.148-155, 2019.
- [8] ABNT ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR-7207 - *Terminologia e classificação de Pavimentação*, Rio de Janeiro, RJ, 1982.
- [9] BEJA I.A., LUCENA A.E.F.L. “Utilização de material fresado em camadas de sub-base e base de pavimentos”, In: *VIII Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande*, Campina Grande, PB, outubro de 2011.
- [10] DIAS, P.S., PINTO, I.E., COSTA, C. “Contribuição ao estudo de materiais fresados incorporados a um solo argilosilteoso para o uso em camadas de pavimentos flexíveis”, In: *44ª RAPv – Reunião anual de pavimentação e 18º ENACOR – Encontro Nacional de Conservação Rodoviária*, Foz do Iguaçu, PR agosto de 2015.
- [11] LUCENA A.E.F.L., OLIVEIRA A.M., NASCIMENTO M.V., *et al.*, “Estudo do comportamento mecânico de misturas asfálticas contendo material fresado a partir da dosagem Marshall”, In: *VIII Congresso de Iniciação Científica da Universidade Federal de Campina Grande*, Campina Grande, PB, outubro de 2011.
- [12] AL-HOMOUD, M. S. “Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials”, *Building and Environment*, v.40, n.3, pp. 353-366, 2005.
- [13] ADITYA, L., MAHLIA, T.M.I., RISMANCHI, B., *et al.*, “A review on insulation materials for energy conservation in buildings”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.37, pp. 1352-1365, 2017.
- [14] CHIÑAS-CASTILLO, F., MORALES-DOMINGUEZ, V. J., ORTIZ-GUZMAN, M. “Thermal conductivity of coconut fibre filled ferrocement sandwich panels”, *Construction and Building Materials*, v.37, pp. 425-431, 2012.

- [15] YEW, M. C., SULONG, N. H. R., CHONG, W. T., *et al.*, "Integration of thermal insulation coating and moving-air-cavity in a cool roof system for attic temperature reduction", *Energy Conversion and Management*, v. 75, pp. 241-248, 2013.
- [16] YANG, J., WU, H., XU, X., *et al.*, "Numerical and experimental study on the thermal performance of aerogel insulating panels for building energy efficiency", *Renewable Energy*, v.138, pp. 445-457, 2019
- [17] INCROPERA F., DE WITT D.P., *Fundamentos da transferência de calor e massa*, 6ª ed., Rio de Janeiro, Editora LTC, 2008.
- [18] KREITH F., *Princípios da transmissão de calor*, 3ª ed., São Paulo, Editora Edgard Blücher, 1977.
- [19] TIPLER P.A, MOSCA G., *Física para cientistas e engenheiros*, 6ª ed., Rio de Janeiro, Editora LTC, Brasil (2009).
- [20] MORAN M.J., SHAPIRO H.N., MUNSON B.R., *et al.*, *Introdução à engenharia de sistemas térmicos. Termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor*, Rio de Janeiro, Editora LTC, 2005.
- [21] LEROY MERLIN. Mantas acústicas. Disponível em: <https://www.leroymerlin.com.br/localizacao> Acessado em Março de 2019.
- [22] TELHAS E CIA. Mantas térmicas face única. Disponível em: <https://www.telhascia.com.br/manta-termica-face-unica-50m-coberfoil> Acessado em Março de 2019.
- [23] Dow, TUFF-R™ and Super TUFF-R™. Disponível em: http://msdssearch.dow.com/PublishedLiteratureDOWCOM/dh_09a8/0901b803809a8de7.pdf?filepath=sty-rofoam/pdfs/noreg/179-07932.pdf&fromPage=GetDoc. Acessado em março de 2019.
- [24] ANEEL Agência Nacional de Energia Elétrica. <http://www.aneel.gov.br/tarifas-consumidores>. Acessado em maio de 2017.
- [25] WEATHERPARK. Condições meteorológicas médias de São Joaquim. Disponível em: <https://pt.weatherspark.com/y/29877/Clima-caracter%C3%ADstico-em-S%C3%A3o-Joaquim-Brasil-durante-o-ano>. Acessado em março de 2019.

ORCID

Mágilla Fetosa Medeiros	https://orcid.org/0000-0002-8735-851X
Marco Antonio Cortellazzi Franco	https://orcid.org/0000-0002-0298-3579
Rogério Bonette Klepa	https://orcid.org/0000-0002-6401-5696
José Carlos Curvelo Santana	https://orcid.org/0000-0001-6517-4907