LUMEN ET VIRTUS
ISSN: 2177-2789

ESTUDO ANALÍTICO E NUMÉRICO DE TETOS PLANOS COMPOSTOS CONTENDO PLACA DE GESSO E RESÍDUO DO CAROÇO DO AÇAÍ

ANALYTICAL AND NUMERICAL STUDY OF COMPOSITE FLAT ROOFS CONTAINING PLASTERBOARD AND AÇAÍ PIT RESIDUE

ESTUDIO ANALÍTICO Y NUMÉRICO DE TECHOS PLANOS COMPUESTOS QUE CONTIENEN PLACAS DE YESO Y RESIDUOS DEL PEPITA DEL AÇAÍ

https://doi.org/10.56238/levv16n53-156

Data de submissão: 01/01/2025 **Data de publicação:** 01/02/2025

Ubiraci Silva Nascimento
Doutor em Engenharia Mecânica
Instituição: Departamento de Física da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)
Endereço: São Luís-MA-Brasil
Orcid:0000-0002-4069-601X

Marcio da Silva Tavares
Doutor em Física
Instituição: Departamento de Física da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)
Orcid: 0000-0002-3832-3492

Edvan Moreira
Pós-Doutor em Física
Instituição: Departamento de Física da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)
Orcid: 0000-0002-5610-2757

Fernando Lima de Oliveira
Doutor em Engenharia Mecânica
Instituição: Departamento de Física da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)
Orcid: 0009-0001-2876-2766

José de Ribamar Pestana Filho
Mestre em Ciência da Educação
Instituição: Departamento de Física da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)
E-mail: ssjpestana@gmail.com

Valter Valder Reis Beckman
Especialista em Física
Instituição: Departamento de Física da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)
Orcid: 0009-0003-9300-1693

Lucas Santos de Oliveira
Doutorando em Engenharia Mecânica
Instituição: Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP)
Endereço: Campinas, São Paulo - Brasil
Orcid:0000-0001-7478-1477

Izak Oliveira Sousa da Silva
Graduando em Engenharia Civil
Instituição: Departamento de Física da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)
Endereço: Maranhão, Brasil
E-mail: izakoliver.eng.br@outlook.com

Isabelle Cristina dos Reis de Andrade Batista
Graduanda em Engenharia Civil
Instituição: Departamento de Física da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)
Endereço: Maranhão, Brasil
E-mail: isabelle.20220058337@aluno.uema.br

João Pedro Silva Lima
Graduando em Engenharia Civil
Instituição: Departamento de Física da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)
Endereço: Maranhão, Brasil
E-mail: joãopedroengciviluema@gmail.com

Gleuberth Ruan Pontes Coelho
Graduando em Engenharia Civil
Instituição: Departamento de Física da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)
Endereço: Maranhão, Brasil
E-mail: Gleuberth.20220058159@aluno.uema.br

Pedro Victor Braga Dias
Graduando em Engenharia Civil
Instituição: Departamento de Física da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA)
Endereço: Maranhão, Brasil
E-mail: pdiaxxvi@gmail.com

RESUMO

Usamos neste projeto, conceitos de condutividade térmica e transferência de calor aplicados em tetos planos, explorando o fato de que a condutividade térmica varia de material para material, proporcionando assim, uma abertura no leque de estudos na área de análise matemática e numérica dessa variação. Para tanto, foi usado um código em MATLAB, aplicando o MDF- método de diferenças finitas no modelo explícito, partindo da discretização da equação de difusão térmica de calor, onde as simulações foram realizadas a partir de dados obtidos das propriedades termo físicas de materiais existentes em literatura, assim como dos dados obtidos experimentalmente, onde foram usados as condutividades térmicas e massa específica das placas de gesso com diferentes adições de biomassa do caroço do Açaí. As análises foram concentradas para avaliar os efeitos na variação do percentual da biomassa adicionada às placas de gesso, espessura do teto, além de analisar e comparar a eficiência de tetos planos feitos com diferentes tipos de materiais. Pretendemos com os resultados desse estudo, está contribuindo com mais uma alternativa de construção, dando-se ênfase ao aspecto térmico de ambientes.

Palavras-chave: Análise Numérica. Açaí. Biomassa. Tetos. Sustentabilidade.

ABSTRACT
In this project, we used concepts of thermal conductivity and heat transfer applied to flat ceilings, exploring the fact that thermal conductivity varies from material to material, thus providing an opening in the range of studies in the area of mathematical and numerical analysis of this variation. To this end, a MATLAB code was used, applying the explicit MDF - finite difference method in the explicit model, starting from the discretization of the thermal diffusion equation, where the simulations were performed based on data obtained from the thermophysical properties of materials found in the literature, as well as data obtained experimentally, where the thermal conductivities and specific mass of gypsum boards with different additions of açaí pulp biomass were used. The analyses focused on evaluating the effects of varying the percentage of biomass added to the gypsum boards and the thickness of the ceiling, as well as analyzing and comparing the efficiency of flat ceilings made with different types of materials. We intend for the results of this study to contribute to another construction alternative, with an emphasis on the thermal aspect of environments.

Keywords: Numerical Analysis. Açaí. Biomass. Ceilings. Sustainability.

RESUMEN
En este proyecto utilizamos conceptos de conductividad térmica y transferencia de calor aplicados a techos planos, explorando el hecho de que la conductividad térmica varía de un material a otro, lo que abre un abanico de estudios en el área del análisis matemático y numérico de esta variación. Para ello, se utilizó un código en MATLAB, aplicando el MDF , método de diferencias finitas en el modelo explícito, a partir de la discretización de la ecuación de difusión térmica del calor, donde las simulaciones se realizaron a partir de datos obtenidos de las propiedades termofísicas de materiales existentes en la literatura, así como de datos obtenidos experimentalmente, donde se utilizaron las conductividades térmicas y la masa específica de las placas de yeso con diferentes adiciones de biomasa del carozo del açaí. Los análisis se centraron en evaluar los efectos de la variación del porcentaje de biomasa añadida a las placas de yeso y el espesor del techo, además de analizar y comparar la eficiencia de los techos planos fabricados con diferentes tipos de materiales. Con los resultados de este estudio, pretendemos contribuir con otra alternativa de construcción, haciendo hincapié en el aspecto térmico de los ambientes.

Palabras clave: Análisis Numérico. Açaí. Biomasa. Techos. Sostenibilidad.

1 INTRODUÇÃO

Esse trabalho se concentra no uso da adição de resíduo do caroço do açaí ao gesso moldadas em formas de placas, como alternativa de construção, como enchimento de **tetos planos**, de forma a avaliar de forma numérica o seu desempenho, dando-se ênfase ao aspecto térmico. Ele foi estruturado de forma que inicialmente foram realizadas revisões bibliográficas do estado da arte consultando diversos artigos atuais que abordam o assunto, em seguida apresentaremos um modelo numérico contendo equações governantes, condições iniciais, condições de contornos e método de resolução (PATANKAR, 1980).

A procura por um material isolante térmico eficaz, resistente e barato para edificações constantemente estão sendo foco de pesquisas científicas mais recentes (FAQ, 2015).

Os tetos também possuem a capacidade de impedir bloquear os raios solares e assim não deixar o ambiente se aquecer. É possível se fazer alguns tratamentos especiais para torná-la mais eficiente no trabalho de bloqueio dos raios do sol (ÇENGEL 2012).

A produção e uso de materiais com melhores eficiências térmicas, torna-se uma alternativa para o investimento em edificações de baixo custo, podendo beneficiar dessa forma, o acesso de uma unidade habitacional para populações de baixa renda.

Lima (2005), desenvolveu uma pesquisa sobre material composto para uso na construção civil, utilizando argamassa de gesso e fibra vegetal, como objetivo obter um novo material que possa ser utilizado como revestimento ou elementos de vedação, agregando a esta propriedade que conduza à baixa condutividade térmica. Os testes realizados indicaram que as propriedades térmicas da Fibra Vegetal proporcionaram um ganho de 27,14 % em isolamento térmico pela redução da condutividade térmica do composto.

Barbosa *et al*. (2019), em estudo de caracterização de partículas de Açaí visando seu potencial uso na construção civil, avaliaram os resíduos de açaí (*Euterpe oleracea e Euterpe precatoria*) caracterizando-as física, química, térmica e morfologicamente. Foram realizados ensaios de densidade por picnometria, verificação de teor de umidade, e dos teores de lignina, celulose e extrativos, de acordo com os parâmetros normativos da TAPPI 204, 211 e 222. O resultado da densidade média das partículas é de 1,49 g/cm^3, com teor de umidade variando de 2 a 6%. Em relação à composição química, observou-se maiores teores de lignina e extrativos, e redução de celulose em relação à outras fibras vegetais. Através da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), observou-se a presença somente do endocarpo do caroço de açaí nas partículas de 8 e 14 Tyler, e maior predominância de fibras nas partículas de 48, 100 e 200 Tyler. O conhecimento das características físico-químicas das partículas de resíduo de açaí faz-se necessário para subsidiar etapas de processamento de compósitos com uso destes materiais. Além disso, a utilização de um resíduo como o caroço do açaí potencializa a redução dos impactos ambientais, fornecendo, principalmente para a construção civil, a possibilidade de

produção de novos materiais mais ecológicos, gerando indicadores de sustentabilidade nas edificações da região amazônica.

A relevância deste projeto é muito grande e abrangente tendo em vista que ele trata de um problema ambiental da atualidade e associa uma nova tecnologia para resolver problemas de conforto térmico de forma sustentável economizando energia e reduzindo os impactos ambientais.

2 METODOLOGIA

O Estudo analítico com a Simulação Numérica pode ser realizado em casa, sem a necessidade do uso das dependências da UEMA, fato que foi motivado pela suspensão das atividades presenciais, devido às restrições impostas pela pandemia da COVID-19, o mesmo aconteceu de forma online, inclusive simultaneamente a realização das atividades do outro projeto experimental. Estas etapas podem andar de forma paralela sem comprometimento dos seus resultados. Para a solução da simulação numérica foi desenvolvido um programa para ser rodado em MATLAB.

Existem diferentes métodos numéricos que podem ser usados para o problema em questão. O método de diferenças finitas é o mais simples, mas pode ser impreciso quando há múltiplos corpos em contato. Os métodos de elementos finitos e volumes finitos são mais adequados para estudar múltiplos corpos em contato, mas são mais complexos computacionalmente. Para isso e por uma questão de praticidade, o código foi discretizado e implementado pelo modelo matemático **MDF – Método de Diferenças Finitas**.

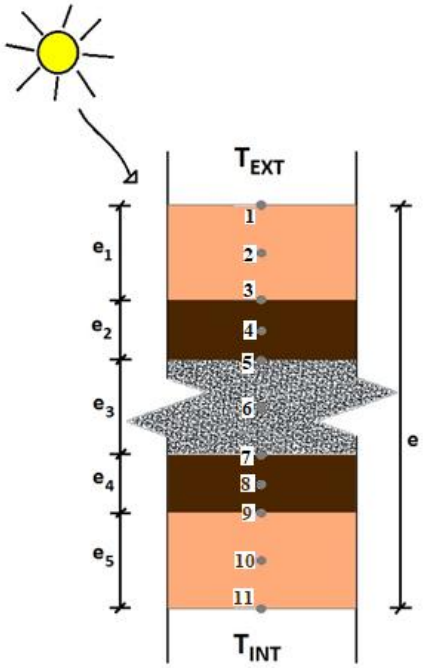
A modelagem iniciou-se a partir da equação da difusão térmica unidimensional em regime transiente para a condução do calor ao longo de uma parede sem geração interna de calor. Esta equação é uma Equação Diferencial Parcial do tipo Parabólica e, para o caso em estudo é do tipo não linear uma vez que as condições de contorno são funções da variável independente tempo, já que é admitido que, a radiação solar incidente na superfície da parede externa e a temperatura ambiental diária variam ao longo das horas do dia (DUFFIE & BECKMAN, 2013). Em virtude dessas características, faz-se necessário o uso de um método numérico para obter a solução da equação. Assim, optou-se por usar o MDF com Esquema Explícito devido a sua simplicidade, vasta literatura disponível e representar satisfatoriamente, fenômenos de transferência de calor unidirecional.

A utilização do método se resume em trabalhar o fenômeno em um domínio discreto de pontos, cujas equações são lineares e mais simples de serem resolvidas do que se fossem trabalhadas no domínio contínuo. Dessa forma, um passo importante do método é a etapa de discretização da equação da difusão de calor para os pontos dentro do corpo do teto e nas fronteiras internas e externas do mesmo. E, levando em consideração que nosso teto é formado por mais de um material dispostos em camadas, temos que admitir cada camada como um corpo com duas fronteiras, o que torna o processo muito mais complexo e trabalhoso.

Os telhados planos em países quentes estão normalmente sujeitos a uma elevada radiação solar e transmitem uma grande parte desta energia solar incidente ao ambiente interno causando desconforto térmico dos ocupantes. As placas compostas com gesso e resíduo do caroço do Açaí podem ser utilizadas para isolamento de telhados planos a fim de reduzir a radiação incidente transmitida. Uma vez que essas placas podem ser colocada em paralelo com a camada de concreto, pelo fato das placas não se misturar ao concreto, não há alteração nas características mecânicas do mesmo. Um telhado plano típico no Brasil é normalmente composto por uma camada externa de argamassa de cimento à prova de água de 20 mm de espessura, laje de concreto de 150 mm de espessura e camada interna de argamassa de acabamento de 20 mm de espessura (NASCIMENTO, 2020).

A Figura a seguir, ilustra o teto composto, que foi idealizada para montagem do algoritmo, inicialmente contendo 05 (cinco) camadas e 11 (onze) pontos de interesse a serem considerados para a elaboração da modelação matemática e posterior simulações.

Figura 1 - Composição do Teto Composto com pontos de interesse



Fonte: Autores (2022)

É conveniente advertir que, embora tenha-se usado algoritmo para cinco camadas, existe a possibilidade de se trabalhar com camadas de números menor que cinco até uma única. Para nosso estudo, foram consideradas todas as camadas, como sendo homogêneas, considerando que:

- Cada camada constituinte dos elementos do nosso teto é homogênea e isotrópica;
- As propriedades térmicas dos materiais que os constituem não variam com a temperatura;
- Não há fontes de calor no interior dos elementos;
- Não há considerações nem infiltrações de humidade nos elementos;
- As condições de fronteiras são simétricas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 DISCRETIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DA DIFUSÃO TÉRMICA

Para começar a discretização, é importante destacar que nosso teto térmico é composto por uma superfície plana que recebe radiação solar, convecção na superfície externa e interna, condução através do teto, condução entre as fronteiras internas dos tetos e condução pura entre o teto de gesso. Consideramos a temperatura inicial uniforme, propriedades físicas dos materiais da construção constantes, coeficiente de transferência de calor por convecção nas faces internas e externas, teto sem umidade e temperatura do ar interna constante.

Para a obtenção da equação governante do problema, tomaremos como base a formulação de diferenças finitas (PATANKAR, 1980).

Pela definição de derivada:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f(x+\Delta x) - f(x)}{\Delta x} \tag{1}$$

Se fizermos primeira derivada pela série de Taylor truncada (x+ Δx em torno de x) e, também, primeira derivada truncada em n=1. E reorganizando a equação obtida, alcançaremos uma equação semelhante a definição da derivada (1) abaixo:

$$\frac{\partial T(x)}{\partial x} = \frac{T(x+\Delta x) - T(x)}{\Delta x} \tag{2}$$

Fazendo a derivada segunda para o ponto m:

$$\frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2}_{m} = \frac{\frac{\partial T(x)}{\Delta x}_{m+1/2} - \frac{\partial T(x)}{\Delta x}_{m-1/2}}{\Delta x} \tag{3}$$

Constituindo:

$$\frac{\partial T(x)}{\Delta x}_{m+1/2} = \frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta x} \; ; \; \frac{\partial T(x)}{\Delta x}_{m-1/2} = \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} \tag{4}$$

Usaremos a substituição da equação (4) na equação (3), obteremos:

$$\frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2}_{m} = \frac{\frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta x} - \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x}}{\Delta x} \tag{5}$$

Alcançando então:

$$\frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2} = \frac{T_{m-1} - 2T_m + T_{m+1}}{\Delta x^2} \quad (6)$$

No caso de condução de calor em regime transiente, a equação governante é derivada da primeira lei da termodinâmica e da equação de Fourier para o fluxo de calor por difusão.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{e_{ger}}{k} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \quad (7)$$

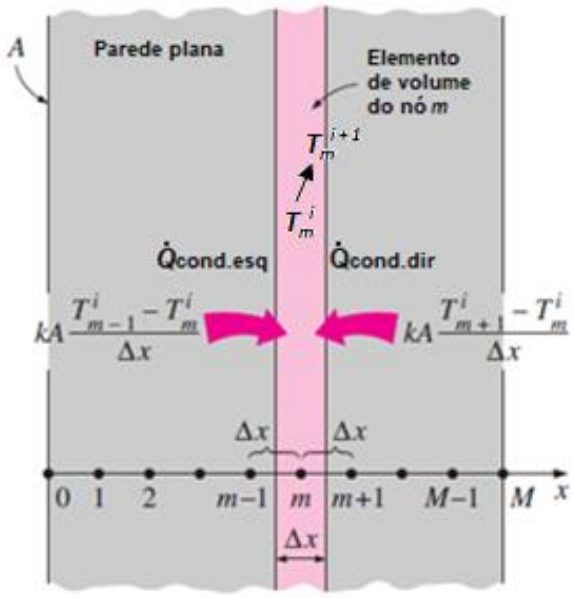
Para o caso da condução do calor em regime transiente unidimensional em uma parede plana e sem geração de calor, temos a seguinte equação:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \quad (8)$$

3.1.1 Discretização no interior de cada camada

Para uma discretização dos nós interiores nos pontos (2;4;6;8 e 10) da Figura 1, fazendo os devidos balanços de energia para o método explicito, se dá da seguinte forma, como mostrado na Figura (2) e Equação (9):

Figura 2 - Pontos no interior da malha



Fonte: Çengel, adaptada

Realizando-se o balanço de energia ou substituindo a equação (6), obtemos a equação:

$$kA\frac{T_{m-1}-T_m}{\Delta x}+kA\frac{T_{m+1}-T_m}{\Delta x}=\rho A\Delta x C_p\frac{T_m^{i+1}-T_m^i}{\Delta t} \quad (9)$$

Multiplicando por $\Delta x/(kA)$, obtemos:

$$T_{m-1}-2.T_m+T_{m+1}=\frac{\rho.\Delta x^2}{k}c_p\frac{T_m^{i+1}-T_m^i}{\Delta t} \quad (10)$$

Para: $(\alpha=\frac{k}{\rho.c_p})$, fica: $$T_{m-1}-2.T_m+T_{m+1}=\frac{\Delta x^2}{\alpha\Delta t}(T_m^{i+1}-T_m^i) \quad (11)$$

Sendo $(\tau=\frac{\alpha\Delta t}{\Delta x^2})$, teremos: $$T_{m-1}-2.T_m+T_{m+1}=\frac{T_m^{i+1}-T_m^i}{\tau} \quad (12)$$

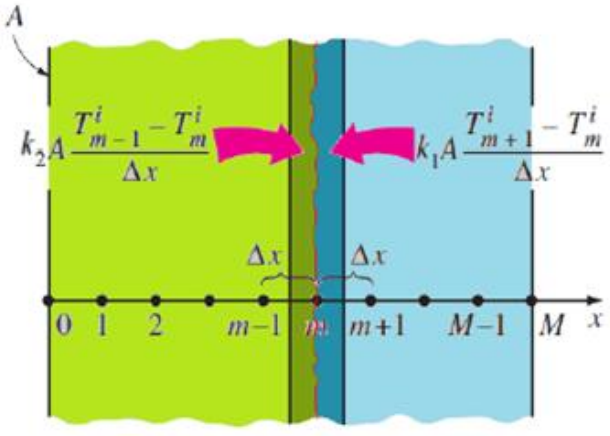
Explicitando-se o termo de interesse e reorganizando-se a equação anterior, temos:

$$T_m^{i+1}=(T_{m-1}-2T_m+T_{m+1})\tau+T_m^i \quad (13)$$

3.1.2 Discretização entre diferentes camadas

Na Figura 1, temos os pontos (3;5;7 e 9) para o problema da condução de calor entre as paredes de materiais diferente, onde temos que assumir para esta descontinuidade, a mudança do material de uma placa para outra e que o nó da malha está no exato ponto entre os dois corpos, como mostrado na Figura 3 abaixo.

Figura 3 - Nó entre as duas placas



Fonte: Çengel, adaptada

Temos então a condução entre dois materiais diferentes k_1 e k_2:

$$k_1 \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} + k_2 \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} = \rho_1 \frac{\Delta x}{2} C_{p1} \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} + \rho_2 \frac{\Delta x}{2} C_{p2} \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (14)$$

Reorganizando:

$$k_1 \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} + k_2 \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} = (\rho_1 \frac{\Delta x}{2} C_{p1} + \rho_2 \frac{\Delta x}{2} C_{p2}) \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (15)$$

Isolando-se o termo de interesse, tem-se:

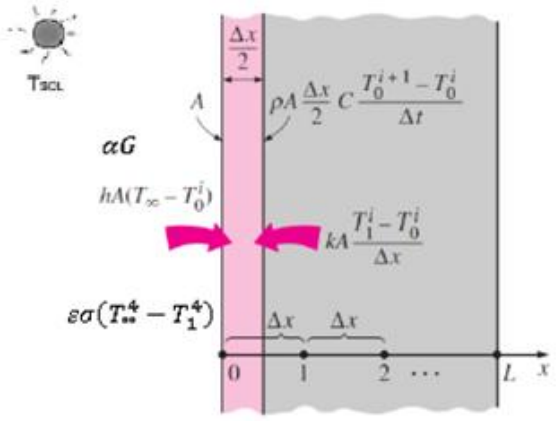
$$\boldsymbol{T_m^{i+1} = \left(k_1 \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} + k_2 \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x}\right) \frac{\Delta t}{\left(\rho_1 \frac{\Delta x}{2} C_{p1} + \rho_2 \frac{\Delta x}{2} C_{p2}\right)} + T_m^i} \quad (16)$$

3.1.3 Discretização da fronteira da face externa

A equação discretizada para o nó **(1)** da Figura 1, situado no contorno da parede externa, admitimos a condição de convecção natural do ar, radiação dada pela lei de Stefan-Boltzmann e radiação solar, temos que a taxa líquida de energia que atravessa a face do elemento infinitesimal e dado pela equação (3.17), onde G é a radiação global (radiação solar), é a absortividade, é a emissividade, $T_{céu}$ é considerada como temperatura ambiente e T_o a temperatura da superfície da parede, conforme (Çengel, 2012) e observando também na figura 4:

$$Q = \alpha G + \varepsilon\sigma(T_{céu}^4 - T_0^4) + h(T_{amb} - T_0) \quad (17)$$

Figura 4 - Condição do nó na fronteira externa



Fonte: Çengel, adaptado

Admitindo a condição de condução vindo do nó posterior junto a equação (17), temos:

$$\alpha G + \varepsilon\sigma(T_\infty^4 - T_0^4) + h(T_\infty - T_0) + k\left(\frac{T_1 - T_0}{\Delta x}\right) = \rho\frac{\Delta x}{2}C_p\frac{T_0^{i+1} - T_0^i}{\Delta t} \quad (18)$$

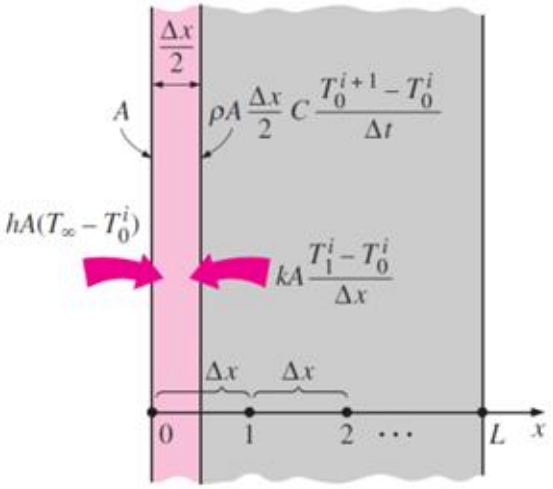
Isolando o termo e reorganizando a equação, temos:

$$T_1^{i+1} = \left(k\frac{(T_1 - T_0)}{\Delta x} + h(T_\infty - T_0) + \epsilon\sigma\left(T_\infty^4 - T_0^4\right) + \alpha G\right)\frac{2\Delta t}{\rho\Delta x C_p} + T_0^i \quad (19)$$

3.1.4 Discretização da fronteira da face interna

Finalmente, conseguimos obter a equação discretizada para o ponto (11) localizado na fronteira da face interna da Figura 1. Na Figura 5, podemos ver o nó de contorno. Neste caso, estamos considerando que a transferência de calor na superfície ocorre apenas por convecção natural pura.

Figura 5 - Discretização na fronteira interna do ambiente.



Fonte: Çengel & Afshin

$$h_A\,(T_\infty - T_0^i) + k.A.\frac{T_1^i - T_0^i}{\Delta x} = \rho.A.\frac{\Delta x}{2}\,c_p\frac{T_0^{i+1} - T_0^i}{\Delta t} \quad (20)$$

Multiplicando por

$$\cdot\left(\frac{2\Delta x}{k.A}\right) \rightarrow \frac{2h\Delta x}{k}(T_\infty - T_0^i) + 2.(T_1^i - T_0^i) = \frac{\rho.\Delta x^2}{k}\,c_p\frac{T_0^{i+1} - T_0^i}{\Delta t} \quad (21)$$

Para:

$$: (\alpha = \frac{k}{\rho . c_p}) \rightarrow \frac{2h\Delta x}{k}(T_\infty - T_0^i) + 2.(T_1^i - T_0^i) = \frac{\Delta x^2}{\alpha \Delta t}(T_0^{i+1} - T_0^i) \quad (22)$$

Organizando:

$$: T_0^{i+1} - T_0^i = \tau\left[\frac{2h\Delta x}{k}(T_\infty - T_0^i) + 2.(T_1^i - T_0^i)\right] \quad (23)$$

Isolando o termo de interesse:

$$T_0^{i+1} = (T_0^i - 2.\tau.T_0^i - \tau.T_0^i \frac{2h\Delta x}{k}) + 2.\tau.T_1^i + 2.\tau.\frac{h\Delta x}{k}.T_\infty^i \quad (24)$$

Que na forma simplificada fica:

$$\boldsymbol{T_0^{i+1} = (1 - 2.\tau - \tau.\frac{2h\Delta x}{k}).T_0^i + 2.\tau.T_1^i + 2.\tau.\frac{h\Delta x}{k}.T_\infty^i} \quad (25)$$

3.1.5 Critério de Estabilidade

A implementação do método explícito é mais fácil e rápida, mas é instável. Para garantir estabilidade, o critério adequado deve ser seguido para evitar oscilações ou divergências nas soluções. Todas as equações foram analisadas e um procedimento automático foi utilizado para escolher o critério mais restritivo.

Após definir os pontos e o espaçamento entre eles, é necessário calcular o passo de tempo seguindo uma relação específica:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x^2}{2\alpha}, \quad onde \ \alpha = k/\rho.\mathrm{Cp} \quad (26)$$

É bom observar que esta relação depende da difusividade térmica do material e do espaçamento da malha.

3.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Foram realizadas diversas simulações numéricas (conforme tabela 01), para avaliar os efeitos da variação de percentual de resíduo do açaí e os efeitos dos diferentes tipos de materiais que podem ser aplicados para fins de comparação com a placa de gesso e resíduo do caroço do açaí. Os dados de radiação solar e temperatura ambiente foram obtidos do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia). Foi utilizado para estas simulações os dados experimentais nos valores de 0,21 W/m.K para a condutividade térmica da placa de gesso e resíduo do açaí com o percentual de 20%, bem como uma massa especifica de 998 Kg/m³, calor especifico de 1090 J/Kg.K, além da absortividade de 0,63 e emissividade de 0,93, dados estes obtidos pelo Çingel, (2012).

Tabela 01 – Dados das simulações numéricas dos tetos

RESUMO DE DADOS PARA AS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DOS TETOS-PROJETO PIVIC-2021

PROJETO DE PESQUISA-NIZAR -PIVIC-UEMA-2021

			ESPESURAS-(m)					total	CONDUT. TÉRMICA-(W/m.K)				
SIMULAÇÃO	GRUPOS	DESCRIÇÃO DA PAREDE	e1	e2	e3	e4	e5	e	k1	k2	k3	k4	k5
S1		TETO PADRÃO-T1-ARG.0%BIOM.	0,025	0,025	0,03	0,025	0,025	0,13	0,53	0,53	0,30	0,53	0,53
S2	(G1)	TETO PADRÃO-T1-ARG.5%BIOM.	0,025	0,025	0,03	0,025	0,025	0,13	0,25	0,25	0,27	0,25	0,25
S3	Biomassa do	TETO PADRÃO-T1-ARG.10%BIOM.	0,025	0,025	0,03	0,025	0,025	0,13	0,18	0,18	0,25	0,18	0,18
S4	Açaí	TETO PADRÃO-T1-ARG.15%BIOM.	0,025	0,025	0,03	0,025	0,025	0,13	0,20	0,20	0,23	0,20	0,20
S5		TETO PADRÃO-T1-ARG.20%BIOM.	0,025	0,025	0,03	0,025	0,025	0,13	0,19	0,19	0,21	0,19	0,19
S6	(G2)	TETO EM LAJE CONVENCIONAL-T6	0,025	0,025	0,03	0,025	0,025	0,13	0,72	0,72	0,72	0,72	0,72
S7	(G3)	TETO PADRÃO-T7-MADEIRA	0,025	0,025	0,03	0,025	0,025	0,13	0,19	0,19	0,21	0,19	0,19
S8	Materiais de	TETO PADRÃO-T8-ALVENARIA	0,025	0,025	0,03	0,025	0,025	0,13	0,72	0,72	0,21	0,72	0,72
S9	Construção	TETO PADRÃO-T9-CONCRETO	0,025	0,025	0,03	0,025	0,025	0,13	1,40	1,40	0,21	1,40	1,40
S10		TETO PADRÃO-T10-GESSO	0,025	0,025	0,03	0,025	0,025	0,13	0,81	0,81	0,21	0,81	0,81

RESUMO DE DADOS PARA AS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DOS TETOS-PROJETO PIVIC-2021

PROJETO DE PESQUISA-NIZAR -PIVIC-UEMA-2021

	MASSA ESPECÍFICA-(Kg/m3)					CALOR ESPECÍFICO-(J/Kg.K)					ABSOR	EMISS
SIMULAÇÃO	p1	p2	p3	p4	p5	c1	c2	c3	c4	c5	alfa	epsilon
S1	1159	1159	1191	1159	1159	2168	2168	1090	2168	2168	0,68	0,93
S2	1031	1031	1142	1031	1031	2623	2623	1090	2623	2623	0,68	0,93
S3	943	943	1116	943	943	1817	1817	1090	1817	1817	0,68	0,93
S4	598	598	1093	598	598	3064	3064	1090	3064	3064	0,68	0,93
S5	458	458	998	458	458	3718	3718	1090	3718	3718	0,68	0,93
S6	1922	1922	1922	1922	1922	835	835	835	835	835	0,63	0,93
S7	545	545	998	545	545	2385	2385	1090	2385	2385	0,59	0,90
S8	1922	1922	998	1922	1922	835	835	1090	835	835	0,63	0,93
S9	2300	2300	998	2300	2300	880	880	1090	880	880	0,60	0,88
S10	800	800	998	800	800	1090	1090	1090	1090	1090	0,35	0,93

RESUMO DE DADOS PARA AS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS DOS TETOS-PROJETO PIVIC-2021

PROJETO DE PESQUISA-NIZAR -PIVIC-UEMA-2021

	Temper. Máx-(oC)		Tempo Tmáx-(h)		Dif.Tempe.	Fator Decrem.	Dif.Tempo(Ret)	Referências	03/08/2022
SIMULAÇÃO	P.ext.	P.int.	T.ext.	T.int.	(oC)	RT*	(h)	Cengel	gráfico
S1	51,72	28,24	12,91	17,54	23,48	0,546	4,63	Lima(2005)/Ávila(2017),Exp.	OK
S2	53,94	25,30	12,64	19,55	28,64	0,469	6,91	Lima(2005)/Ávila(2017),Exp.	OK
S3	56,16	24,74	12,42	18,68	31,42	0,441	6,26	Lima(2005)/Ávila(2017),Exp.	OK
S4	55,73	24,95	12,47	18,69	30,78	0,448	6,22	Lima(2005)/Ávila(2017),Exp.	OK
S5	56,09	24,81	12,44	18,60	31,28	0,442	6,16	Lima(2005)/Ávila(2017),Exp.	OK
S6	49,56	31,36	12,85	15,66	18,20	0,633	2,81	Tab-A5;A8;A19,Exp.	OK
S7	53,48	24,83	12,44	17,60	28,65	0,464	5,16	Tab-A5;A8;Exp.	OK
S8	51,55	29,16	12,88	16,07	22,39	0,566	3,19	Tab-A5;A8;Exp.	OK
S9	49,20	30,06	13,22	16,17	19,14	0,611	2,95	Tab-A5;A8;Exp.	OK
S10	42,48	27,46	12,93	15,03	15,02	0,646	2,10	Tab-A5;A8;Exp.	OK

Fonte: Autores (2022)

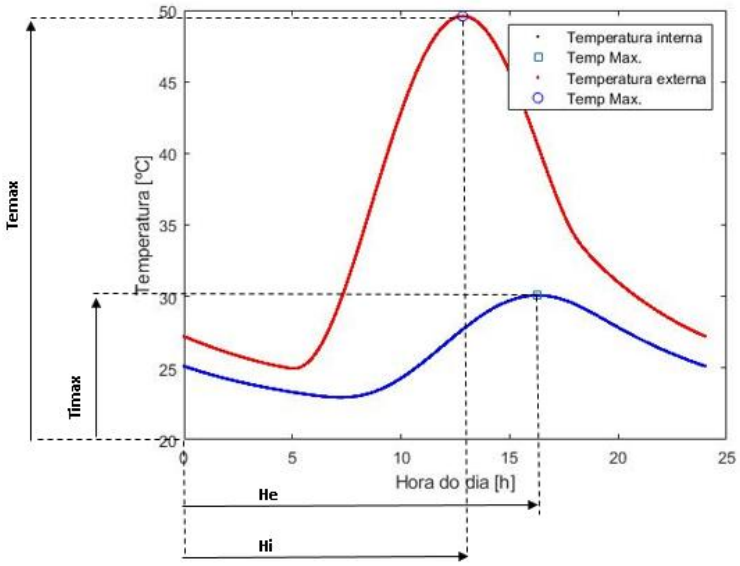
3.2.1 Teto simples de lajotas cerâmicas e concreto

Na Figura 6, podemos observar a temperatura externa e interna do teto ao longo das 24h do dia, destacando a temperatura máxima na parede externa, chegando aos 49,56 ºC, ocorrendo por volta de

12:85h e na parede interna com um pico de 31,36ºC próximo as 15:66h. Através do resultado podemos observar um retardamento do pico de temperatura (RET= diferença da hora em que ocorre a temperatura máxima no teto externo em relação ao interno), provocado pela resistência e condutividade térmica do material ao longo da parede. Outra análise que pode ser obtida é o fator de decremento (RT*= razão entre a temperatura máxima do teto interno e a temperatura máxima do teto externo).

Os valores obtidos para o RT= 0,633 e RET=2,81h.

Figura 6 - Temperatura do teto simples ao longo do dia.



Fonte: Autores (2022)

3.2.2 Teto composto com percentuais diferentes de resíduo do açaí

Para o teto composto de resíduo do caroço de açaí, foi considerado 5cm de lajota cerâmica para cada teto com a camada interna preenchida com placas de 3cm com diferentes adições de percentual da biomassa do açaí, variando entre 0 e 20%, totalizando uma espessura total de 13cm.

Das simulações pudemos obter a Figura 7, na qual demonstra que o fator de decremento se reduz à proporção que se aumenta o percentual de resíduo agregado à placa, ocorrendo a máxima redução para 10% de resíduo aditivado. O que nos leva a concluir que o percentual de eficiência do teto composto com a adição de 10% de resíduo comparada com o teto composto com a placa de gesso sem a adição dele foi de **19,23%** na redução da carga térmica para o interior do ambiente.

Figura 7 - Efeito da variação do percentual de resíduo do açaí no teto composto nos valores de RT* e RET

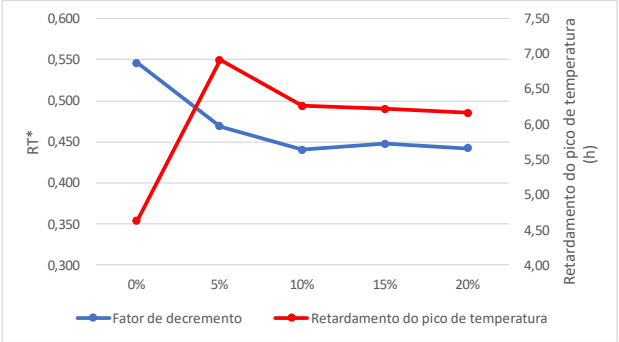


Tabela 02 – Percentual de resíduo açaí aplicados nas placas de gesso

RESÍDUO DO CAROÇO DE AÇAÍ EM PLACAS DE GESSO	RT*	RET
0%	**0,546**	**4,63**
5%	**0,469**	**6,91**
10%	**0,441**	**6,26**
15%	**0,448**	**6,22**
20%	**0,442**	**6,16**

Fonte: Autores (2022)

3.2.4 Teto com diferentes materiais utilizados

Para esta simulação foram analisados quatro tipos de materiais diferentes: O teto composto de laje de lajota cerâmica padrão simulados anteriormente, o teto de faces externas de madeira com condutividade térmica de 0,19 W/m.K, massa especifica de 545 Kg/m³ e calor especifico de 2385 J/Kg.k e a placa de alvenaria cerâmica e resíduo do açaí com condutividade térmica de 0,21 W/m.K, massa especifica de 1922 Kg/m³ e calor especifico de 1090 J/Kg.k.

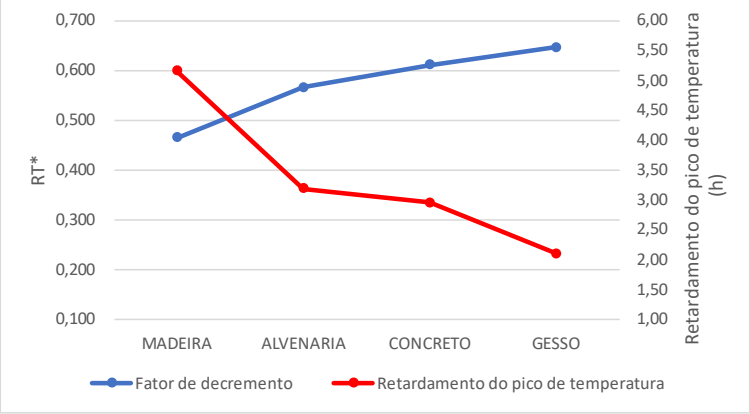
Na Figura 8, podemos analisar que os materiais estão organizados de forma crescente em relação a condutividade térmica, da esquerda para a direita, e com o aumento da condutividade térmica dos materiais eleva o fluxo de calor para a superfície interna da parede diminuindo o retardamento do pico de temperatura (RET) e aumentando o fator de decremento (RT*).

Ao compararmos tetos de madeira e de concreto, podemos perceber que o primeiro é em torno de **24,06%** mais confortável termicamente.

Tabela 03 – Variação do tipo de material de construção do teto.

MATERIAIS DE CONTRUÇÃO	RT*	RET
MADEIRA	**0,464**	**5,16**
ALVENARIA	**0,566**	**3,19**
CONCRETO	**0,611**	**2,95**
GESSO	**0,646**	**2,10**

Figura 8 - Efeito da variação do tipo de material do teto nos valores de RT* e RET



Fonte: Autores (2022)

4 CONCLUSÃO

Foi verificado que, o aumento dos percentuais de adição de biomassa, bem como a utilização de materiais com características de baixa condutividade térmica na composição dos tetos planos, observou-se o retardamento do fluxo de calor ao longo da laje composta, aumentando o retardamento de pico da temperatura, melhorando o conforto térmico do ambiente interno, e consequentemente, reduzindo o uso de aparelhos de ar-condicionado e ventiladores.

- Fazendo a comparação do teto proposto com adição de biomassa a 20% (Tab.01= RT*= 0,442) e o teto de laje convencional (Item 4.2.1= RT*=0,633), o ganho térmico ao substituirmos o teto convencional pelo proposto, foi de **30,17%.** Diante dos resultados expostos, podemos considerar que a camada composta de gesso e resíduo do caroço de açaí foi essencial no isolamento térmico do teto composto, considerando as diferenças encontradas nas simulações.

REFERÊNCIAS

BARBOSA, A. de M.; REBELO, V. S. M.; MARTORANO, L. G.; GIACON, V. M. "**Caracterização de Partículas de Açaí Visando seu Potencial Uso na Construção Civil",** In: *Revista Matéria*, ISSN 1517-7076, v.24, n.3, 2019. UFRJ – Rio de Janeiro, 2019.

ÇENGEL, Y. A.; AFSHIN, J.G. **Transferência de Calor e massa: uma abordagem prática**. Porto Alegre, Editora Mc Graw Hill, 2012. 904p.

DUFFIE. J. A. & BECKMAN, W. A. **Solar energy thermal processes**. 4. ed. New York, Wiley Interscience, 2013.

FAQ – **Imóveis e Construção**. Disponível em http://www.faq.inf.br/imoveis-construcao/parede-acustica-e-termica-o-que-e-vantagens-e-como-fazer/. Acessado em 05/01/2012.

LIMA, João Pinto; **Modelagem e Teste de Condutividade Térmica em Placa de Gesso e Fibra Vegetal, *Mauritia vinifera Martius*, para uso na Construção Civil**. Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2005, 140 p. Trabalho Final de Mestrado Profissional.

NASCIMENTO, U. S. **Borracha de Pneus no Isolamento Térmico de Paredes e Tetos: Modelagem, Validação e Comparação com Paredes Convencionais**. 180p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) UNICAMP- Universidade Estadual de Campinas. São Paulo, 2020.

PATANKAR, S. V. **Numerical Heat Transfer and Fluid Flow**. Hemisphere Publishing Corporation, Taylor & Francis Group, New York, 1980.