

**ESTUDO ANALÍTICO E NUMÉRICO DE UMA PAREDE TÉRMICA MISTA
CONTENDO PLACA DE GESSO E FIBRA VEGETAL DO BABAÇU**

 <https://doi.org/10.56238/sevened2025.011-004>

Ubiraci Silva Nascimento

Doutor em Engenharia Mecânica-UNICAMP
São Luís, Maranhão-Brasil
E-mail: ubiracisn@gmail.com
ORCID:0000-0002-4069-601X

Edvan Moreira

Doutor em Física -UFC
São Luís, Maranhão-Brasil
E-mail: edvan.moreira@fisica.uema.br
ORCID:0000-0002-5610-2757

Marcio da Silva Tavares

Doutor em Física-IFMA/UEMA
São Luís, Maranhão-Brasil
E-mail: plasmatavares@yahoo.com.br
ORCID:0000-0002-3832-3492

Renato Rodrigues Luz

Doutorando em Física Teórica-UNB
São Luís, Maranhão-Brasil
E-mail: renatoluzrgs@gmail.com
ORCID:0000-0002-0712-7763

Jorge de Jesus Passinho e Silva

Mestre em Engenharia Mecânica-UNICAMP
São Luís, Maranhão-Brasil
E-mail: jorgepassinho@gmail.com

José de Ribamar Pestana Filho

Mestre em Ciência da Educação – IPLAC/UEMA
São Luís, Maranhão-Brasil
E-mail: ssjpestana@gmail.com

Valter Valder Reis Beckman

Especialista em Física-UFMA/UEMA
São Luís, Maranhão-Brasil
E-mail: valter52beckman@gmail.com

Lucas Santos de Oliveira

Doutorando em Engenharia Mecânica - UNICAMP
Campinas, São Paulo - Brasil
E-mail: 1235220@dec.unicamp.br
ORCID:0000-0001-7478-1477



Willian de Vasconcelos Silva
Mestrando em Engenharia Mecânica-UNICAMP
São Paulo, Campinas-Brasil
E-mail: williansilva2@aluno.uema.br

Nizar Mohsen Felix Mota
Bacharel em Engenharia da Computação-UEMA
São Luís, Maranhão-Brasil
E-mail: motta.reig1@hotmail.com

RESUMO

Neste estudo, foi usado conceitos de condutividade térmica e transferência de calor aplicados a paredes térmicas, 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 isso, o projeto apresenta o desenvolvimento de 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 termofísicas de materiais existentes em literatura, assim como dos dados obtidos experimentalmente de outro estudo paralelo a esse, onde foram usados as condutividades térmicas e massa específica das placas de gesso com diferentes adições de biomassa da fibra do babaçu. As análises foram concentradas para avaliar os efeitos na variação do percentual da biomassa adicionada às placas de gesso, espessura das paredes, cor da pintura da parede externa, além de analisar e comparar a eficiência de paredes feitas 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.

Palavras-chave: Análise Numérica. Biomassa do Babaçu. Gesso. Sustentabilidade.

1 INTRODUÇÃO

Neste Estudo apresentamos uma alternativa de uso da adição da fibra da folha da palmeira de babaçu ao gesso moldadas em formas de placas, como alternativa de construção, como enchimento de uma parede mista de alvenaria tradicional de tijolos maciços, de forma a avaliar numericamente o seu desempenho, dando-se ênfase ao aspecto térmico. Ele será estruturado de forma que inicialmente será realizada uma revisão bibliográfica 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).

Babaçu é o nome comum de várias espécies do gênero *Attalea* (*A. Speciosa*, *A. brasiliensis*), que ocorrem tanto na floresta Amazônica, quanto no bioma Cerrado. Consiste em uma palmeira robusta e imponente com estipe isolado (tronco) de até 20 metros de altura e de 25 a 44 centímetros de diâmetro, com 7 a 22 folhas medindo de 4 a 8 metros de comprimento (SILVA e TASSARA, 1991; HENDERSON, 1995; LORENZI 1996 et al., BRANDÃO et al., 2002).

Essa espécie possui vários sinônimos citados na literatura como: *Attalea apoda* Burret; *A. camposportoana* Burret; *A. lydiae* (Drube) Barb. Rodr.; *A. puxuna* Barb. Rodr.; *Orbignya barbosiana* Burret; *O. huebneri* Burret; *O. macropétala* Burret; *O. macrostachya* Dr.; *O. martiana* Barb. Rodr.; *O. oleifera* Burret; *O. phalerata* Mart.; *O. pixuna* (Barb. Rodr.) Barb. Rodr.; *O. speciosa* (Mart. ex Spreng.) Barb. Rodr. (LORENZI et al., 1996; BRANDÃO et al, 2002. Popularmente é conhecido como: babaçu, babassu, baguaçuí, uauaçu, aguaçu, bauaçu, coco-de-macaco, coco-de-palmeira, coco-naiá, coco-pindoba, pindoba, guaguaço, baguaçu, auaçu (SILVA e TASSARA, 1991; LORENZI et al., 1996; BRANDÃO et al, 2002).

O coco babaçu é um produto nativo das terras brasileiras, o que, segundo economistas, ecologistas e especialistas em bioenergia, pode ser considerado um privilégio, visto que o aproveitamento do babaçu é integral, desde a sua folha até a semente, sendo, portanto, um produto de representatividade para a economia. É de importância fundamental trabalharmos com o coco babaçu por se tratar de uma matéria de subsistência tanto para as quebradeiras, como para a indústria brasileira, havendo possibilidade de ser matéria artesanal e industrial ao mesmo tempo. Seus subprodutos são comercializados tanto em feiras livres como no mercado externo. Observando o produto por nós investigado, percebemos que, além de sua beleza, este cocal traz esperança para a população que dela sabe extrair: o leite, o óleo, o carvão, entre outros. Como já mencionamos anteriormente, o processo dos subprodutos do babaçu tem se expandido bastante e a cultura criada a partir do trabalho manual, realizado pelas quebradeiras, nos permite vislumbrar a necessidade da criação de um glossário por meio do qual se possa ter acesso ao léxico referente ao produto, bem como ao processo industrial ou artesanal originado desse vegetal. O processo a que é submetido o

coco babaçu tem passado por diversas modificações e inovações em seus métodos, além disso, são perceptíveis as diferenças existentes entre o processo manual e o industrial. Tais mudanças, inovações e diferenças acarretam mudanças nos termos utilizados. São criados novos termos para designar ações, objetos e coisas utilizadas na realização do trabalho. Nesse sentido, faz-se necessário observar que se conte com material que possa facilitar a compreensão de técnicas, métodos e objetos para que a utilização e funcionalidade do produto sejam intensas. (LUCENA, J. M., 2008)

Borges et al. (2018), em estudo de viabilidade da produção de tijolos solo-cimento com resíduos da construção civil e a fibra do coco babaçu, desenvolveram um trabalho motivados a assistir comunidades de baixa renda que almejam construir casas de alvenaria próximas as áreas de extração de babaçuais e levando em consideração a necessidade do uso de recursos que sejam fontes naturais renováveis e recicláveis. Através de verificação da viabilidade de produção de um tijolo solo-cimento, tendo como matérias-primas a fibra do coco babaçu e o resíduo de construção e demolição tipo A, a partir da comparação de resultados obtidos por meio da literatura. Analisando as classes referentes a ensaios básicos em relação aos tijolos convencionais.

Silva et al. (2004), apresentaram no III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica em Belém-PA, um trabalho por título “fibras do coco como indutor de isolamento térmico em tijolos solo-cimento”, onde utilizaram o pó da fibra da casca do coco como agregado na composição de tijolos de solo-cimento. Foram fabricados tijolos na concentração de 6% em pó com relação ao cimento. Realizaram-se testes para análise da resistência mecânica (compressão) e determinação da condutividade térmica, com base em normas ABNT e ASTM, respectivamente. Comparados tijolos de solo cimento convencional, considerado padrão no desenvolvimento da pesquisa, os tijolos de solo-cimento com agregado apresentaram redução da condutividade térmica sem comprometimento da resistência mecânica. Os resultados apontam para a possibilidade de utilização dessa alternativa na redução da carga térmica em habitações populares, contribuindo, dessa forma, para reduzir o desconforto térmico em habitações localizadas em regiões com elevado índice de insolação, como é o caso do Nordeste do Brasil.

Ainda na perspectiva do estudo da viabilidade da utilização da fibra de coco babaçu em formulações de tijolo solo-cimento, mais um trabalho analisou as características de tijolos ecológicos confeccionados com fibra de coco babaçu para atender aos critérios de aceitação por norma para uma boa resistência mecânica, absorção de água, durabilidade e conforto térmico dos tijolos ecológicos. Os teores de adição da fibra aplicados nesta pesquisa foram de 0%, 0,5%, 1%, 1,5% e 2% em uma massa utilizada na produção de tijolo ecológico. O traço adotado de 7/1 para proporção de solo em relação ao cimento. Os corpos de prova foram confeccionados em tamanho padrão em uma prensa manual simples. Foram realizados ensaios tecnológicos de absorção de água

e resistência mecânica nos corpos de prova, seguindo as normas da ABNT 8491:2012, para um período de cura nas idades de 7,14, 21 e 28 dias para a molhagem do tijolo solo-cimento. Também foram realizados ensaios de caracterização das matérias-primas como: granulometria, limites de consistência, difração de raios X e fluorescência de raios X, assim como um estudo da comparação do conforto térmico promovido pelos tijolos produzidos com e sem adição da fibra. Os resultados mostraram que adição da fibra de coco babaçu no tijolo solo-cimento influencia positivamente na resistência mecânica, obtendo-se assim um material apropriado para o sistema construtivo de alvenaria sem função estrutural (CARVALHO, 2019)

Em trabalho de nome “aproveitamento da fibra do epicarpo do coco babaçu em compósito com matriz de epóxi: estudo do efeito do tratamento da fibra”, foram analisadas as características químico-físicas de fibra oriundas do epicarpo do coco babaçu (*Orbignyda Phalerata*), sendo determinados os principais teores dos constituintes da fibra: lignina Klason insolúvel, celulose, holocelulose, hemicelulose e os teores de cinzas e de umidade. Foi realizado um estudo da modificação superficial das fibras do epicarpo do coco babaçu sob efeito de tratamento químico por alcalinização, em solução aquosa de NaOH a 2,5% (m/v) e a 5,0% (m/v), visando melhorar a compatibilização matriz/reforço em compósito com a matriz de epóxi. Os resultados das modificações ocorridas nas fibras foram estudados através de técnicas de termogravimetria (TG) e de calorimetria exploratória diferencial (DSC). Os resultados encontrados nas análises térmicas em amostras de fibras sem tratamento químico e em amostras de fibras tratadas por alcalinização mostram que o tratamento químico proposto aumentou a estabilidade térmica das fibras e proporcionou um crescimento na área superficial das fibras, parâmetros que melhoram a adesão fibra/compósito (FRANCO, 2010).

Pela definição de Çengel (2012), parede térmica é aquela que tem a capacidade de bloquear os raios solares não deixando-os aquecer o ambiente interno. Toda parede tem alguma resistência ao sol, mas é possível fazermos alguns tratamentos especiais para torná-la mais eficiente no tarefas de bloqueio dos raios solares.

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.

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

Existem vários métodos numéricos possíveis de serem utilizados para o caso em questão, dentre eles: o de diferenças finitas, elementos finitos e volumes finitos. O primeiro, corresponde ao mais simples dos três e de mais fácil implementação computacional, porém possui certa dificuldade e imprecisão da malha quando tratado para múltiplos corpos em contato. Enquanto os outros têm melhor adaptação ao estudo de múltiplos corpos em contato ou em descontinuidades ao longo de um corpo estudado, porém implementação computacional mais trabalhosa e complexa.

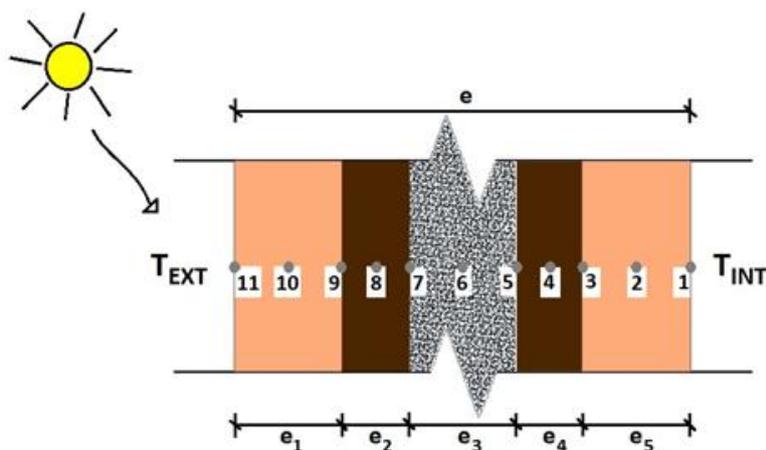
Em vista a isso e por uma questão de simplificação iremos discretizar e implementar o modelo matemático pelo **MDF – Método de Diferenças Finitas**.

Iniciamos a modelagem 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 chamada 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. 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 da parede e nas fronteiras internas e externas da mesma. E, levando em consideração que nossa parede é formada 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.

Usaremos a figura a seguir para ilustrar uma parede mista que, inicialmente, foi idealizada composta de duas camadas externas de tijolos, uma central de fibra de coco babaçu e duas finas camadas de madeira compensada tipo “*madeirite*” que envolve a camada de fibra. Desse modo, teremos 05 (cinco) camadas e 11 (onze) pontos de interesses a serem considerados para a elaboração da modelação matemática e posterior simulações.

Figura 1 - Composição da parede composta com pontos de interesse



Fonte: Autores (2020)

Convém advertir que, apesar de termos utilizado algoritmo para cinco camadas, foi empregado somente três, substituindo a camada de madeira também por alvenaria nas simulações dos resultados. Para nosso estudo, foram consideradas as camadas das paredes de alvenarias como sendo homogêneas

Desse modo, passamos a considerar:

- Cada camada constituinte dos elementos da nossa parede e 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 umidade nos elementos;
- As condições de fronteiras são simétricas.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES PARCIAIS

3.1 DISCRETIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DA DIFUSÃO TÉRMICA

Para início do processo de discretização, precisamos enfatizar, que nossa parede térmica é composta por uma superfície plana sujeita a radiação solar incidente, convecção na superfície da parede externa e interna, condução através da parede, condução entre as fronteiras internas das paredes e condução pura entre a parede de gesso. Considerando a temperatura inicial uniforme, propriedades físicas dos materiais construtivos constantes, coeficiente de transmissão de calor convectivo, das faces internas e externas, constantes, parede sem umidade, e temperatura do ar no ambiente interno constante.

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

Pela definição de derivada:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (3.1)$$

Se fizermos primeira derivada pela série de Taylor truncada ($x + \Delta x$ 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 (3.1) abaixo:

$$\frac{\partial T(x)}{\partial x} = \frac{T(x + \Delta x) - T(x)}{\Delta x} \quad (3.2)$$

Fazendo a derivada segunda para o ponto m :

$$\frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2}_m = \frac{\frac{\partial T(x)}{\Delta x}_{m+1/2} - \frac{\partial T(x)}{\Delta x}_{m-1/2}}{\Delta x} \quad (3.3)$$

Constituindo $\frac{\partial T(x)}{\Delta x}_{m+1/2} = \frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta x}$; $\frac{\partial T(x)}{\Delta x}_{m-1/2} = \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x}$ (3.4)

Usaremos a substituição da equação (3.4) na equação (3.3), obteremos:

$$\frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2}_m = \frac{\frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta x} - \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x}}{\Delta x} \quad (3.5)$$

Alcançando então:

$$\frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2} = \frac{T_{m-1} - 2T_m + T_{m+1}}{\Delta x^2} \quad (3.6)$$

Para o caso envolvendo condução do calor em regime transiente, que resulta da equação da energia (primeira lei da termodinâmica) e da equação de Fourier para os termos de fluxo de calor por difusão, temos a equação governante do problema:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{e_{ger}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.7)$$

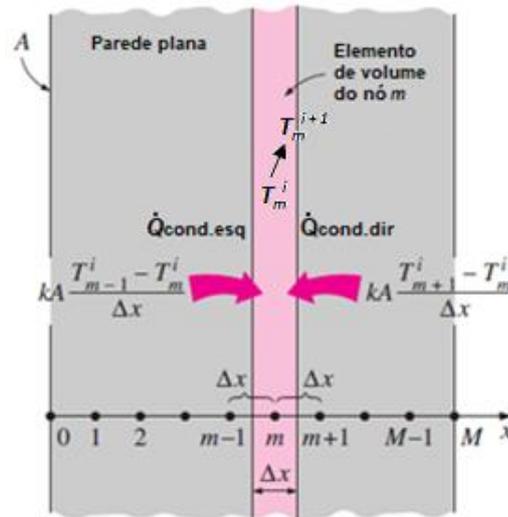
Para o caso da condução do calor em regime transiente unidimensional em uma parede plana e sem geração de calor, temos a seguinte equação:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3.8)$$

3.1.1 Discretização no interior de cada camada

A discretização para os nós interiores, sendo eles os pontos (2;4;6;8 e 10) da Figura 1, fazendo os devidos balanços de energia para o método explícito, se dá da seguinte forma, como mostrado na Figura (2) e Equação (3.9):

Figura 2 - Pontos no interior da malha



Fonte: Çengel (2012), adaptada

Substituindo na equação anterior e realizando o balanço de energia, obtemos a equação:

$$kA \frac{T_{m-1}^i - T_m^i}{\Delta x} + kA \frac{T_{m+1}^i - T_m^i}{\Delta x} = \rho A \Delta x C_p \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (3.9)$$

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

$$T_{m-1} - 2.T_m + T_{m+1} = \frac{\rho \cdot \Delta x^2}{k} C_p \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (3.10)$$

Para: $(\alpha = \frac{k}{\rho \cdot c_p})$, fica: $T_{m-1} - 2.T_m + T_{m+1} = \frac{\Delta x^2}{\alpha \Delta t} (T_m^{i+1} - T_m^i)$ (3.11)

Sendo $(\tau = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2})$, teremos: $T_{m-1} - 2.T_m + T_{m+1} = \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\tau}$ (3.12)

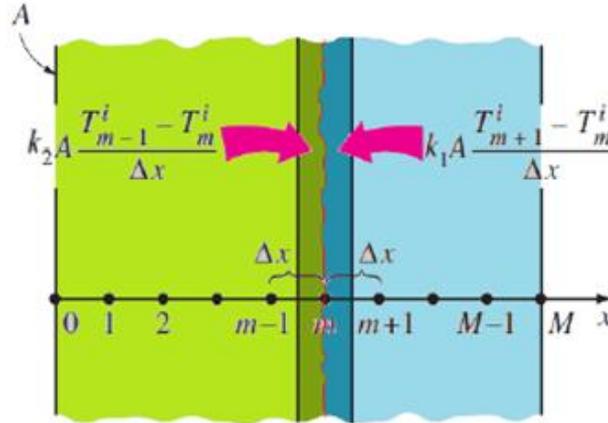
Reorganizando e explicitando o termo de interesse, temos:

$$T_m^{i+1} = (T_{m-1} - 2T_m + T_{m+1})\tau + T_m^i \quad (3.13)$$

3.1.2 Discretização entre diferentes camadas

Para o problema da condução de calor entre as paredes de materiais diferente, temos os pontos (3;5;7 e 9) da Figura 1, 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 (2012), adaptada

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

$$k_1 \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} + k_2 \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} = \rho_1 \frac{\Delta x}{2} C_{p1} \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} + \rho_2 \frac{\Delta x}{2} C_{p2} \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (3.14)$$

Reorganizando:

$$k_1 \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} + k_2 \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} = (\rho_1 \frac{\Delta x}{2} C_{p1} + \rho_2 \frac{\Delta x}{2} C_{p2}) \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (3.15)$$

Que isolando o termo de interesse, tem-se:

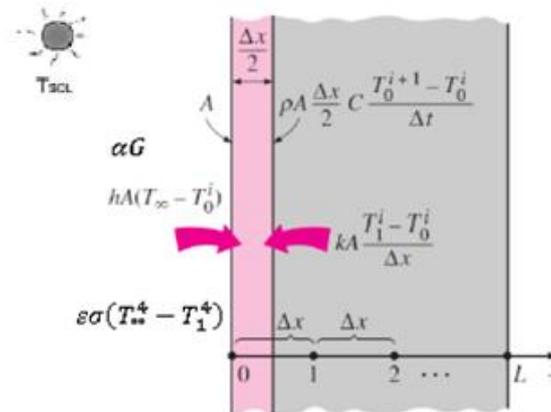
$$T_m^{i+1} = \left(k_1 \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} + k_2 \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} \right) \frac{\Delta t}{(\rho_1 \frac{\Delta x}{2} C_{p1} + \rho_2 \frac{\Delta x}{2} C_{p2})} + T_m^i \quad (3.16)$$

3.1.3 Discretização da fronteira da face externa

A equação discretizada para o nó (11) 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), ϵ é a absortividade, ϵ 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:

Figura 4 - Condição do nó na fronteira externa

$$Q = \alpha G + \varepsilon \sigma (T_{c\acute{e}u}^4 - T_0^4) + h(T_{amb} - T_0) \quad (3.17)$$



Fonte: Çengel (2012), adaptado

Admitindo a condição de condução vindo do nó posterior junto a equação (3.17), temos:

$$\alpha G + \varepsilon \sigma (T_{\infty}^4 - T_0^4) + h(T_{\infty} - T_0) + k \left(\frac{T_1 - T_0}{\Delta x} \right) = \rho \frac{\Delta x}{2} C_p \frac{T_0^{i+1} - T_0^i}{\Delta t} \quad (3.18)$$

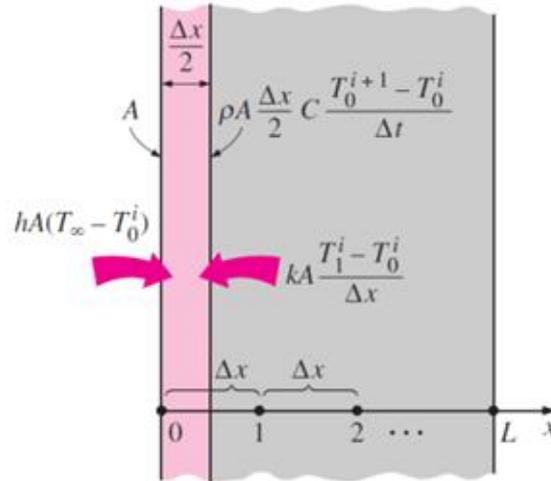
Isolando o termo e reorganizando a equação, temos:

$$T_1^{i+1} = \left(k \frac{(T_1 - T_0)}{\Delta x} + h(T_{\infty} - T_0) + \varepsilon \sigma (T_{\infty}^4 - T_0^4) + \alpha G \right) \frac{2\Delta t}{\rho \Delta x C_p} + T_0^i \quad (3.19)$$

3.1.4 Discretização da fronteira da face interna

Finalmente, temos a equação discretizada para o ponto (1) da Figura 1, situados na fronteira da face interna, como mostrados na Figura 5, nós de contorno, assumindo que a única transferência na superfície ocorre por convecção puramente natural, conforme equação a seguir:

Figura 5 - Discretização na fronteira interna do ambiente.



Fonte: Çengel (2012)

$$h_A (T_\infty - T_0^i) + k.A. \frac{T_1^i - T_0^i}{\Delta x} = \rho.A. \frac{\Delta x}{2} c_p \frac{T_0^{i+1} - T_0^i}{\Delta t} \quad (3.20)$$

Multiplicando por

$$\left(\frac{2\Delta x}{k.A} \right) \Rightarrow \frac{2h\Delta x}{k} (T_\infty - T_0^i) + 2. (T_1^i - T_0^i) = \frac{\rho.\Delta x^2}{k} c_p \frac{T_0^{i+1} - T_0^i}{\Delta t} \quad (3.21)$$

Para:

$$: (\alpha = \frac{k}{\rho.c_p}) \Rightarrow \frac{2h\Delta x}{k} (T_\infty - T_0^i) + 2.(T_1^i - T_0^i) = \frac{\Delta x^2}{\alpha \Delta t} (T_0^{i+1} - T_0^i) \quad (3.22)$$

$$\text{Fazendo } (\tau = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2}), \text{ temos } \Rightarrow \frac{2h\Delta x}{k} (T_\infty - T_0^i) + 2.(T_1^i - T_0^i) = \frac{T_0^{i+1} - T_0^i}{\tau} \quad (3.23)$$

Organizando:

$$: T_0^{i+1} - T_0^i = \tau \left[\frac{2h\Delta x}{k} (T_\infty - T_0^i) + 2. (T_1^i - T_0^i) \right] \quad (3.24)$$

Isolando o termo de interesse:

$$T_0^{i+1} = (T_0^i - 2.\tau.T_0^i - \tau.T_0^i \frac{2h\Delta x}{k}) + 2.\tau.T_1^i + 2.\tau.\frac{h\Delta x}{k}.T_\infty \quad (3.25)$$

Que na forma simplificada fica:

$$T_0^{i+1} = (1 - 2.\tau - \tau.\frac{2h\Delta x}{k}).T_0^i + 2.\tau.T_1^i + 2.\tau.\frac{h\Delta x}{k}.T_\infty \quad (3.26)$$

3.1.5 Critério de Estabilidade

A implementação do método explícito é mais fácil e rápida de ser realizada, porém é um método instável e para sua utilização, deve-se considerar o critério de estabilidade para evitar que as soluções

oscilem ou divirjam da solução real. Todas as equações de diferenças finitas foram analisadas e o procedimento para escolha do critério de estabilidade mais restritivo foi utilizado para o cálculo e ficou automatizado dentro do programa.

Uma vez determinado o número de pontos e um espaçamento uniforme entre os nós consecutivos, o passo de tempo deve satisfazer a seguinte relação:

$$\Delta t \leq \frac{\Delta x^2}{2\alpha}, \quad \text{onde } \alpha = k/\rho.C_p \quad (3.27)$$

Relação esta que depende da difusividade térmica do material e do espaçamento da malha.

3.2 RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES

Foram realizadas diversas simulações numéricas para avaliar os efeitos da variação de percentual de biomassa, espessura da camada interna, cor da pintura da parede externa e os efeitos dos diferentes tipos de materiais que podem ser aplicados para fins de comparação com a placa mista de gesso e fibra do coco babaçu. 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 0,25 W/m.K para a condutividade térmica da placa com babaçu, bem como uma massa específica de 1107 Kg/m³ e calor específico de 1090 J/Kg.K, dados estes obtidos pelo Çingel (2012).

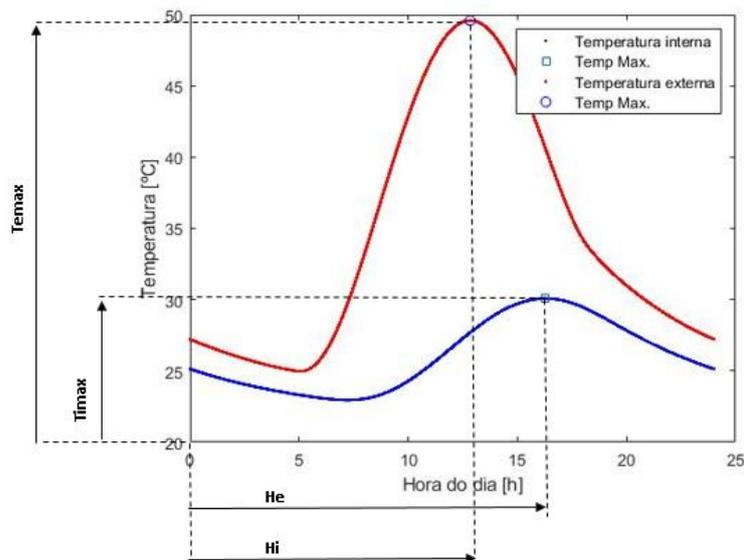
3.2.1 Parede simples de alvenaria

Inicialmente foi realizada a simulação com uma parede simples de tijolo cerâmico comum de 15cm de espessura com condutividade térmica de 0,72 W/m.K, massa específica de 1922 Kg/m³, calor específico de 835 J/Kg.K, absorvidade de 0,63 e emissividade de 0,93.

Na Figura 6 podemos observar a temperatura externa e interna da parede ao longo das 24h do dia, destacando a temperatura máxima na parede externa, chegando aos 49,58 °C, ocorrendo por volta de 13:00h e na parede interna com um pico de 30,08°C próximo as 16:30h. Através do resultado podemos observar um retardamento do pico de temperatura (RET= diferença da hora em que ocorre a temperatura máxima na parede externa em relação a interna), 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 da parede interna e a temperatura máxima da parede externa).

Os valores obtidos para o RT= 0,607 e RET=3,44h.

Figura 6 - Temperatura da parede simples ao longo do dia.



Fonte: Autores (2020)

3.2.2 Parede composta com percentuais de biomassa da fibra do babaçu

Para a parede composta de biomassa, foi considerado 5cm de alvenaria para cada parede com a camada interna preenchida com placas de 3cm com diferentes adições de percentual 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 biomassa agregado à placa, ocorrendo a máxima redução para 10% de biomassa aditivada. O que nos leva a concluir que o percentual de eficiência da parede composta com a adição de 10% de biomassa comparada com a parede composta com a placa de gesso sem a adição dela foi de 13,57% na redução da carga térmica para o interior do ambiente.

Figura 7 - Efeito da variação do percentual de biomassa na parede composta nos valores de RT* e RET

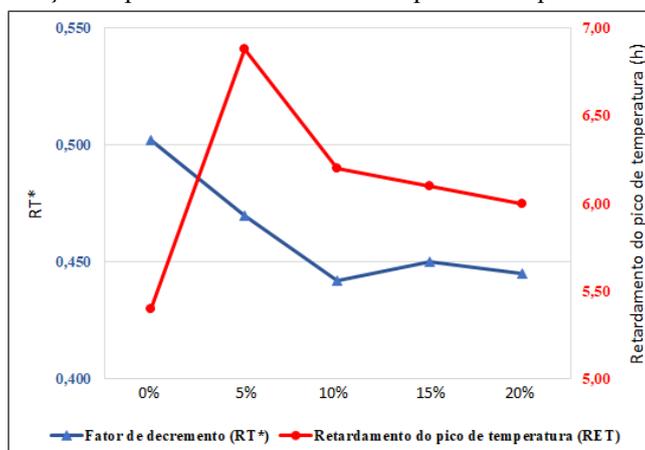


Tabela 01 – Percentual de biomassa aplicadas nas placas de gesso

BIOMASSA EM PLACAS DE GESSO	RT*	RET
0%	0,502	5,40
5%	0,470	6,88
10%	0,442	6,20
15%	0,450	6,10
20%	0,445	6,00

Fonte: Autores (2021)

3.2.3 Variação da espessura interna da parede composta com biomassa da fibra do babaçu

Para essas simulações, foram utilizadas as mesmas condições das feitas acima, apenas variando a espessura interna onde se encontra a placa mista de gesso e fibra de babaçu.

Na Figura 8, para o fator de decremento RT*, observamos que quanto maior a espessura da parede, maior é a resistência térmica, reduzindo a taxa de transferência de calor e consequentemente reduzindo a temperatura máxima da superfície interna. O intervalo de tempo definido como o tempo em que a temperatura máxima atinge a superfície interna aumenta com o aumento da espessura da parede (Retardamento do pico de temperatura). Podemos perceber que a redução da carga térmica quando se aumenta de 12 para 25cm a espessura da parede é de 34,31%.

Figura 8 - Efeito da variação da espessura da parede composta nos valores de RT* e RET

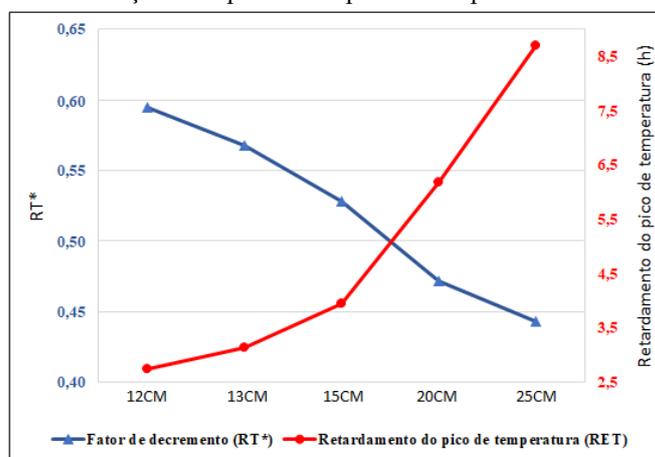


Tabela 02 – Variação da espessura da parede composta com adição de biomassa à 20%

ESPESSURA	RT*	RET
12cm	0,595	2,74
13cm	0,568	3,14
15cm	0,528	3,96
20cm	0,472	6,18
25cm	0,443	8,69

Fonte: Autores (2021)

3.2.4 Variação da cor da superfície externa da parede composta

Para essas simulações, foram utilizadas as mesmas condições das feitas anteriormente, sendo utilizada a parede composta padrão de 13cm de espessura.

Podemos observar na Figura 9 que pelo fato de paredes pintadas com cores claras refletirem mais e paredes escuras serem mais absorvente, percebe-se mais variações nos valores do fator de decremento, sendo que o retardamento de pico da temperatura quase não se alterou. Podemos observar que entre paredes externas pintadas de cores branca e preta, só a opção em pintar de branca, já temos uma otimização de 30% no conforto do ambiente interno.

Figura 9 - Efeito da variação da cor da pintura da parede externa nos valores de RT* e RET

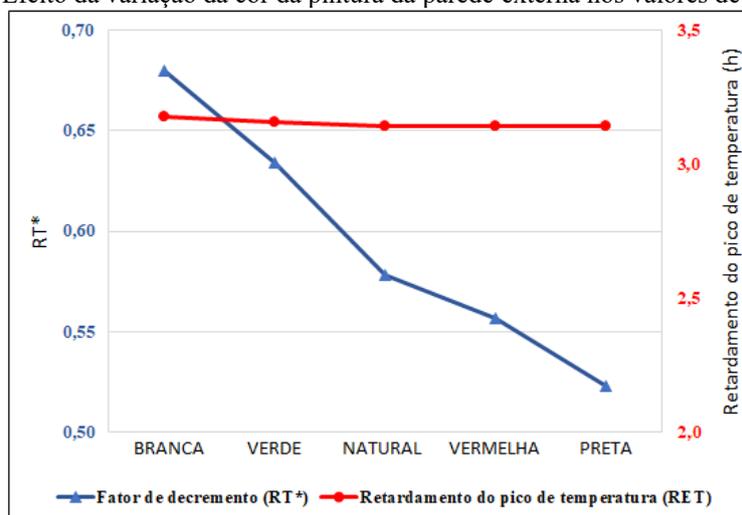


Tabela 03 – Variação da cor da pintura da parede externa

CORES	RT*	RET
BRANCA	0,68	3,18
VERDE	0,634	3,16
NATURAL	0,578	3,14
VERMELHO	0,557	3,14
PRETA	0,523	3,14

Fonte: Autores (2021)

3.2.5 Variação dos materiais utilizados

Para esta simulação foram analisados quatro tipos de materiais diferentes: A parede de alvenaria composta padrão simulados anteriormente, a parede de faces externas de madeira com condutividade térmica de 0,19 W/m.K, massa específica de 545 Kg/m³ e calor específico de 2385 J/Kg.k e a placa de biomassa com condutividade térmica de 0,25 W/m.K, massa específica de 1107 Kg/m³ e calor específico de 1090 J/Kg.k.

Na Figura 10, 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 paredes de madeira e de concreto, podemos perceber que a primeira é em torno de 35% mais confortável termicamente.

Figura 10 - Efeito da variação do tipo de material da parede nos valores de RT* e RET

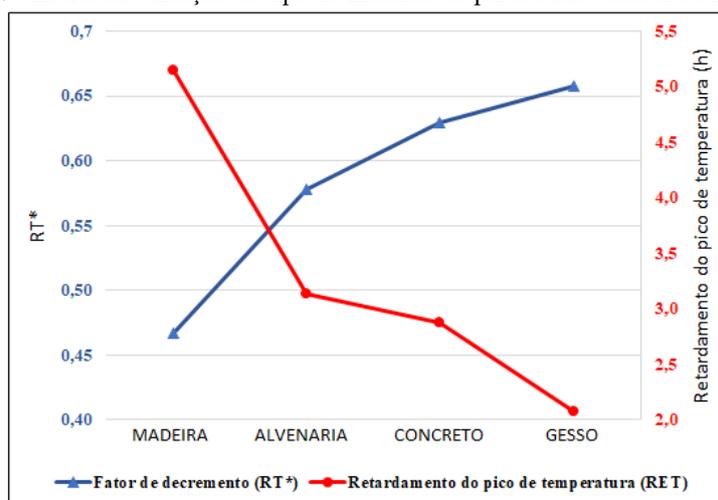


Tabela 04 – Variação do tipo de material de construção da parede

MATERIAIS DE CONTRUÇÃO	RT*	RET
MADEIRA	0,467	5,15
ALVENARIA	0,578	3,14
CONCRETO	0,629	2,87
GESSO	0,658	2,08

Fonte: Autores (2021)

4 CONCLUSÃO

Com aumento da espessura das paredes, bem como a utilização de materiais com características de baixa condutividade térmica retardam o fluxo de calor ao longo da parede composta, aumentando o retardamento de pico da temperatura, melhorando o conforto térmico do ambiente interno, e conseqüentemente, reduzindo o uso de energia elétrica para ligarmos aparelhos de ar-condicionado e ventiladores.

A utilização de outros tipos de materiais nas construções civis, podem ser interessante do ponto de vista do conforto térmico, visto que os materiais de construção geralmente tem a condutividade térmica relativamente elevada, sendo um melhor condutor de calor, eleva o fluxo de calor para a superfície interna da parede, diminuindo o retardamento do pico de temperatura e aumentando o fator de decremento, e conseqüentemente, aumentando os gastos com energia.

Diante dos resultados expostos, podemos considerar que a camada de fibra de coco babaçu foi essencial no isolamento térmico da parede mista, considerando as diferenças encontradas nas simulações.



REFERÊNCIAS

BORGES, L. A. A.; VIANA, G. A. S.; LOBATO, M. F. Estudo de viabilidade da produção de tijolos solo-cimento com resíduos da construção civil e a fibra do coco babaçu. Anais: VI Semana de Engenharia no Maranhão. Universidade Federal do Maranhão, 2018, São Luis-MA.

BRANDÃO, M.; LACA-BUENDIA, J. P.; MACEDO, J. F. Árvores nativas e exóticas do estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: EPAMIG, 2002. 528 p.

CARVALHO, R. S. de Sá. Estudo da viabilidade da utilização da fibra de coco babaçu em formulações de tijolo solo-cimento. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Piauí, 2019.

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

FRANCO, F. J. P. Aproveitamento da fibra do epicarpo do coco babaçu em compósito com matriz de epóxi: Estudo do efeito do tratamento da fibra. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal-RN, 2010.

HENDERSON, A. The palms of the Amazon. New York: Oxford University Press, 1995. 362 p.

LIMA, J. P. 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.

LORENZI, H.; SOUZA, H.M., de; MEDEIROS-COSTA, J.T. de; CERQUEIRA, L.S.C. de; BEHR, N. von. Palmeiras no Brasil: nativas e exóticas. Nova Odessa: Plantarum, 1996. 303p.

LUCENA, J. M. de. Uma palmeira em muitos termos: a terminologia da cultura agroextrativista, industrial e comercial do coco babaçu. 2008. 178f. – Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Departamento de Letras Vernáculas, Programa de Pós-graduação em Linguística, Fortaleza (CE), 2008.

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

SILVA, L. C. F. S.; MENDES, J. U. L.; MARINHO. G. S. Fibras do coco como indutor de isolamento térmico em tijolos solo-cimento. Anais: III Congresso Nacional de Engenharia Mecânica. Belém-PA, 2004.

SILVA, S.; TASSARA, H. Frutas no Brasil. São Paulo: Empresa das Artes, 1991. 230p.