


ESTUDO ANALÍTICO E NUMÉRICO DE UMA PAREDE TÉRMICA COM GARRAFAS PET

 <https://doi.org/10.56238/arev7n2-032>

Data de submissão: 05/01/2025

Data de publicação: 05/02/2025

Ubiraci Silva Nascimento

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

Fernando Lima de Oliveira

Doutor em Engenharia mecânica-ITA
São Luís, Maranhão-Brasil
E-mail: fernandolima@cct.uema.br
ORCID: 0009-0001-2876-2766

Marcio da Silva Tavares

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

Edvan Moreira

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

Renato Rodrigues Luz

Doutorando em Física Teórica
Universidade de Brasília (UnB)
E-mail: renatoluzrgs@gmail.com

André Santos da Silva Neto

Mestre em Engenharia de Materiais-IFMA
São Luís, Maranhão-Brasil
E-mail: andre.silva@ifma.edu.br

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

RESUMO

A presente trabalho abordou um estudo, partindo das equações analíticas que regem a transmissão de calor, seguido de uma modelagem numérica para formulação de um algoritmo capaz de simular a condução do calor unidimensional em regime transiente de uma parede térmica composta de tijolos cerâmicos e garrafas pet em seu interior. O algoritmo foi implementado no Matlab e utiliza o Método de Diferenças Finitas Explícito no processo da discretização do problema da difusão térmica. Três aspectos principais se tornaram foco dessa pesquisa, o primeiro foi a comparação da parede simples de alvenaria com a parede composta com fragmentos da garrafa PER, o segundo foi a variação de espessura da camada interna contendo PET e finalmente a variação dos materiais que compõem a parede interna. Com os resultados das simulações foi possível avaliar a utilização das garrafas PET como um bom isolante térmico de paredes, tendo uma melhora de **17,79%**, no isolamento térmico considerável se comparado a paredes convencionais de apenas alvenaria, ainda foi comprovada a influência no aumento da espessura com a redução da carga térmica, além de ratificar também que, a parede com PET comparada com outros tipos de isolantes como: madeira, borracha e alvenaria, apresentou uma resposta bem melhor.

Palavras-chave: Garrafas PET. Modelagem Numérica. Parede Térmica.

1 INTRODUÇÃO

A contribuição do aquecimento e refrigeração para o conforto térmico em residências representa grande parte do consumo de energia elétrica, visto ainda que o Brasil se localiza próximo a linha do Equador, onde a incidência solar é alta, e as temperaturas elevadas por também ser um país tropical. Grandes esforços são dados para projetar residências de baixo consumo de energia, utilizando materiais não convencionais na indústria civil, com propriedades térmicas isolantes, que ajudam a obter o conforto térmico.

Devido ao grande calor no território Brasileiro, principalmente nos estados do nordeste, faz-se necessários o uso de ar condicionados para se obter um bom conforto térmico, sendo este aparelho um dos vilões do consumo de energia elétrica, sendo responsável por algo em torno de 20% a 25% do consumo de energia elétrica de uma residência ou empresa (Ismail,2003).

Diante disso as garrafas PET se tornam um material interessante a ser aplicado. O politereftalato de etileno, mais conhecido como PET, é um tipo de plástico muito utilizado na fabricação de garrafas (refrigerantes, água, sucos, óleos e etc...) e de alguns tipos de tecidos. Do ponto de vista químico, o PET é um polímero termoplástico.

Conforme define a NBR 15220-1/2005 (ABNT, 2005), O conforto térmico está ligado à satisfação psicofisiológica do indivíduo, às condições térmicas do ambiente. Pois as habitações, além de terem a função de abrigar o homem e proteger do sol, dos ventos, das chuvas e outros perigos, também lhe devem propiciar conforto.

O conforto térmico depende de variáveis físicas ou ambientais e também de variáveis subjetivas ou pessoais. As principais variáveis físicas que influenciam no conforto térmico são: temperatura do ar, temperatura radiante térmica, umidade do ar e velocidade relativa do ar. As variáveis pessoais envolvidas são: atividade desempenhada, vestimenta utilizada e taxa de metabolismo da pessoa. Ainda, há as variáveis características individuais, aspectos psicológicos, culturais e hábitos (FANGER, 1970).

Definimos parede Térmica, como sendo aquela parede que tem a capacidade de impedir bloquear os raios solares e assim não deixar o ambiente se aquecer. Toda parede tem alguma resistência ao sol, mas é possível fazer alguns tratamentos especiais para torná-la mais eficiente no trabalho de bloqueio dos raios do sol (ÇENGEL,2012).

Existem diversos estudos realizados para investigar o desempenho térmico de paredes, que tem como objetivo o isolamento térmico, melhorando a eficiência energética e conforto térmico. A seguir serão demonstrados alguns estudos analisando variáveis construtivas e suas influências nos resultados.

Dentre estudos que vêm sendo desenvolvidos sobre a utilização de materiais com a finalidade de minimizar os efeitos térmicos. Em sua dissertação, Vivian Sousa em estudo experimental estudou o comportamento das argamassas de revestimentos compostas por gesso puro, gesso/EVA (ethylene-vinyl acetate copolymer) e gesso/vermiculita apresentando as condutividades térmicas de 0,43 W/mK, 0,41 W/mK e 0,22 W/mK, respectivamente, comportando-se como isolantes térmicos (SOUSA 2012).

Em seu estudo numérico Ávila (2018) investigou três paredes térmicas; parede simples usada como parede de referência, parede simples com diferentes revestimentos na superfície externa, adição de biomassa em blocos de construção e parede dupla com espaçamento cheio de ar estagnado ou água. Os resultados mostraram que aplicação dessas estratégias ou combinações delas pode aumentar a massa térmica do sistema, reduzir as flutuações de temperatura no ambiente interno e reduzir as perdas de energia.

Dentre os produtos utilizados para isolar termicamente, existem os que dificultam a transferência do calor por condução (isolantes resistivos) e os que minimizam a passagem por radiação (isolantes reflexivos) (VITTORINO et al., 2003).

A maior parte dos materiais da construção civil não é de origem metálica (concreto, tijolo, entre outros), assim estes materiais absorvem grande parte da radiação solar, aquecem-se e transferem o calor para o interior da edificação (VITTORINO et al., 2003).

Segundo Incropera (2008, p.2) “transferência de calor (ou calor) é a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço”, portanto, sempre que houver uma diferença de temperaturas entre meios, haverá uma transferência de calor.

De acordo com Creder (2004), carga térmica é a quantidade de calor sensível e latente, que deve ser retirada ou colocada no recinto a fim de proporcionar as condições desejadas. Essa carga térmica pode ser introduzida no recinto a condicionar por: Condução; Insolação; Dutos; Pessoas; Equipamentos; Infiltração; Ventilação.

Para analisar as paredes térmicas é necessário conhecer os meios de transferência de calor envolvidos no problema, que podem ser condução, convecção e radiação.

Condução é dada pela interação de partículas de maior energia de uma dada substância com partículas adjacentes de menor energia e pode ocorrer em líquidos, sólidos ou gases (Çengel, 2012). E tem sua relação expressa na forma diferencial pela lei de condução de calor de Fourier para condução de calor, conforme Equação (01):

$$Q = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (01)$$

Q = Taxa de condução de calor

k = Condutividade térmica

∂T = Diferença de temperatura

∂x = Espessura

Convecção é o modo de transferência de calor entre uma superfície sólida e o líquido ou gás adjacente que está em movimento e que envolve os efeitos combinados de condução e movimento do fluido. De acordo com Coutinho (2005), o coeficiente de convecção depende da geometria, rugosidade e posição da superfície sólida, das propriedades termo físicas e, principalmente da velocidade do fluido. A taxa de transferência de calor é expressa pela lei de Newton do resfriamento, e é proporcional à diferença de temperatura entre o fluido e a parede, conforme Equação (02):

$$Q = hA_s(T_s - T_{\infty}) \quad (02)$$

h = Coeficiente de transferência de calor por convecção

E a radiação, também conhecida como irradiação, é uma forma de transferência de calor que ocorre por meio de ondas eletromagnéticas. Como essas ondas podem propagar-se no vácuo, não é necessário que haja contato entre os corpos para haver transferência de calor. A energia emitida por uma superfície se distribui uniformemente em diversas direções. Consequentemente, as trocas de calor variam com a distância e a posição de uma superfície em relação a outra (Çengel, 2012). A taxa de radiação emitida pela parede é menor que a emitida pelo um corpo negro dado pela lei de Stefan-Boltzmann, e é expressa conforme Equação (03):

$$Q = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (03)$$

ε = Emissividade da superfície

$\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ é a constante de Stefan-Boltzmann

2 METODOLOGIA

Inicialmente foram realizadas pesquisas bibliográficas, afim de se obter, o máximo de conhecimento sobre o fenômeno ocorrido na transferência de calor, assim como o domínio das equações governamentais que envolvem o problema, para poder realizar a formulação da programação numérica e subsequente sua simulação.

2.1 DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

A parede composta é compreendida por uma camada de alvenaria seguido de uma camada de garrafas pet cortadas e por fim outra camada de alvenaria. Sua superfície externa plana é sujeita a radiação solar incidente e convecção do ar, seguido por condução ao longo da parede composta até a extremidade oposta.

O problema visou simular a parede composta sofrendo radiação solar ao longo do dia, e observar a influência e importância das garrafas pet no isolamento térmico da parede.

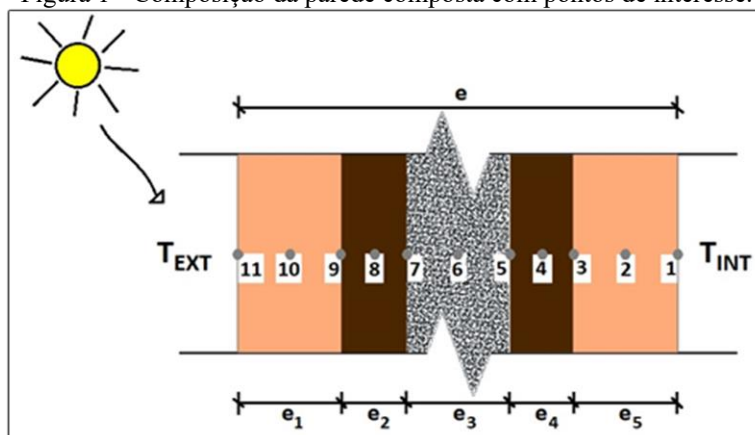
2.2 MODELAGEM PARA SIMULAÇÃO

A modelagem inicia-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 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 Método de Diferenças Finitas com Esquema Explícito devido a sua simplicidade e vasta literatura disponível.

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 suas fronteiras. 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.

A Figura 1 a seguir, ilustra a parede mista, que foi idealizada inicialmente composta de duas camadas externas de tijolos, uma central preenchida com fragmentos da garrafa PET e duas finas camadas de madeira compensada tipo “madeirit” que envolve a camada de fibra. Assim teremos 05 (cinco) camadas e 11 (onze) pontos de interesse a serem considerados para a elaboração do código, modelação matemática e posterior simulações.

Figura 1 - Composição da parede composta com pontos de interesse.



Fonte: Autor, 2022

Convém ressaltar que, embora o algoritmo tenha sido montado para cinco camadas, foi utilizado somente três, substituindo as camadas de madeirite também por alvenaria nas simulações dos resultados. Para nosso estudo, foram consideradas as camadas das paredes, como sendo homogêneas, considerando que:

- Cada camada constituinte dos elementos da nossa parede 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.

2.3 DISCRETIZAÇÃO DA EQUAÇÃO DA DIFUSÃO TÉRMICA

2.3.1 Formulação de derivada em diferenças finitas

Pela definição de derivada:

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (04)$$

Primeira derivada pela série de Taylor truncada ($x + \Delta x$ em torno de x).

$$T(x + \Delta x) = \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{n!} \frac{\partial^n T(x)}{\partial x^n} \Delta x^n \quad (05)$$

Primeira derivada truncada em $n=1$:

$$T(x + \Delta x) = T(x) + \frac{\partial T(x)}{\partial x} \Delta x \quad (06)$$

Reorganizando a equação:

$$\frac{\partial T(x)}{\partial x} = \frac{T(x + \Delta x) - T(x)}{\Delta x} \quad (07)$$

Assim obtendo uma equação semelhante a definição de derivada (1).

Fazendo a derivada segunda para o ponto m:

$$\frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2}_m = \frac{\frac{\partial T(x)}{\Delta x}_{m+1/2} - \frac{\partial T(x)}{\Delta x}_{m-1/2}}{\Delta x} \quad (08)$$

Sendo:

$$\frac{\partial T(x)}{\Delta x}_{m+1/2} = \frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta x} ; \quad \frac{\partial T(x)}{\Delta x}_{m-1/2} = \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} \quad (09)$$

Substituindo a equação (09) na equação (08), temos:

$$\frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2}_m = \frac{\frac{T_m - T_{m-1}}{\Delta x} - \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x}}{\Delta x} \quad (10)$$

Obtendo assim então:

$$\frac{\partial^2 T(x)}{\partial x^2} = \frac{T_{m-1} - 2T_m + T_{m+1}}{\Delta x^2} \quad (11)$$

Para o caso envolvendo condução do calor em regime transiente, temos a equação de Fourier, que é a equação governante do problema:

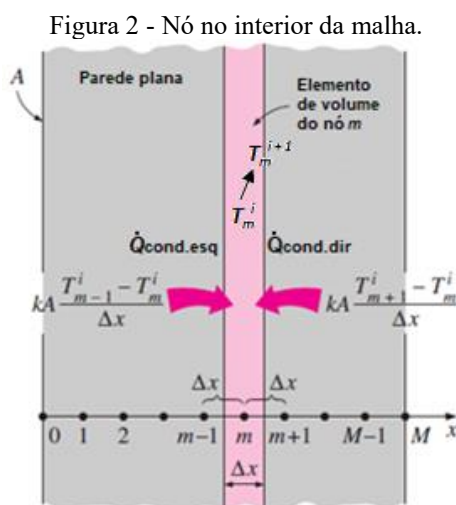
$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{e_{ger}}{k} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (12)$$

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

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (13)$$

2.3.2 Para o nó interior

A discretização para os nós interiores, sendo eles os pontos (2;4;6;8 e 10) da Figura 1 anterior, fazendo os devidos balanços de energia para o método explícito, se dá da seguinte forma, como mostrado na Figura (2) e Equação (14)



Fonte: Çengel, adaptada pelo autor.

Substituindo a equação (11) ou realizando o balanço de energia, obtemos a equação (14):

$$k_1 \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} + k_2 \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} = \rho \Delta x C_p \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (14)$$

Fazendo as considerações necessárias:

$$T_{m-1} - 2T_m + T_{m+1} = \frac{\rho \Delta x^2 C_p}{k} \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (15)$$

Tal que,

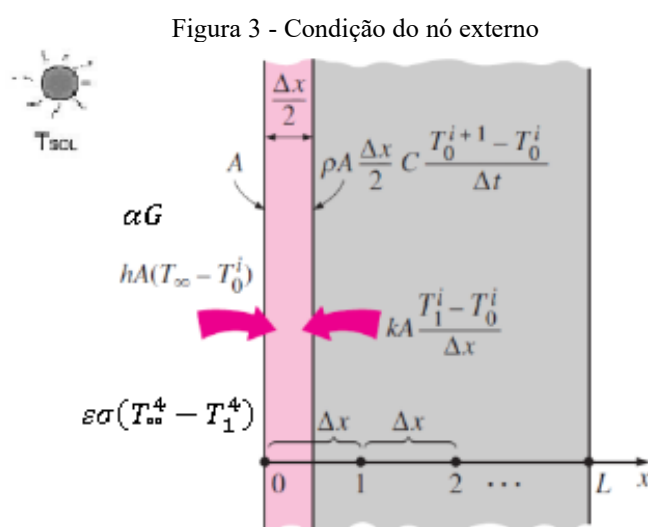
$$\alpha = \frac{k}{\rho C_p}, \quad \tau = \frac{\alpha \Delta t}{\Delta x^2} \quad (16)$$

Reorganizando:

$$T_m^{i+1} = (T_{m+1} - 2T_m + T_{m+1})\tau + T_m^{i+1} \quad (17)$$

2.3.3 Para o nó de fronteira ou face externa

A equação discretizada para o nó situado no contorno externo da parede (Ponto 11) da figura:01, admitindo a condição de condução do nó posterior, convecção do ar, radiação direta e radiação difusa incidindo na parede como observado na figura (3), fazendo o balanço de energia da equação (18), temos a equação (19):



Fonte: Çengel adaptado pelo autor.

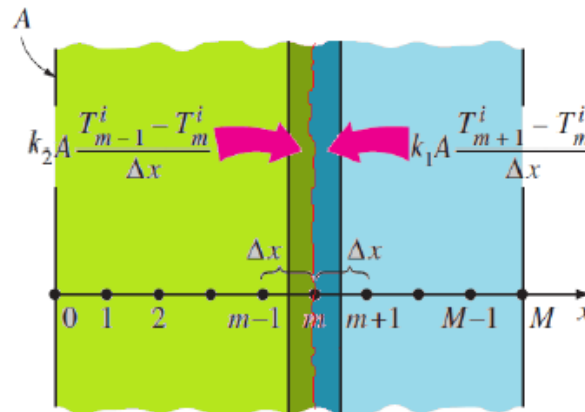
$$k \left(\frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \right) + h(T_\infty - T_1) + \varepsilon\sigma(T_\infty^4 - T_1^4) + \alpha G = \rho \frac{\Delta x}{2} C_p \frac{T_1^{i+1} - T_1^i}{\Delta t} \quad (18)$$

$$T_1^{i+1} = \left(k \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x} + h(T_1 - T_\infty) + \varepsilon\sigma(T_\infty^4 - T_1^4) + \alpha G \right) \frac{\Delta t}{\rho \Delta x C_p} + T_1^i \quad (19)$$

2.3.4 Para o nó entre 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, e assumindo 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 imagem abaixo.

Figura 4 - Nó entre as duas placas.



Fonte: Çengel adaptado pelo autor

Temos então a condução entre dois materiais diferentes k1 e k2:

$$k_1 \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} + k_2 \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} = \rho_1 \frac{\Delta x}{2} C_{p1} \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} + \rho_2 \frac{\Delta x}{2} C_{p2} \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (20)$$

$$\text{Reorganizando: } k_1 \frac{T_{m-1} - T_m}{\Delta x} + k_2 \frac{T_{m+1} - T_m}{\Delta x} = \left(\frac{\rho_1 C_{p1} + \rho_2 C_{p2}}{2} \right) \Delta x^2 \frac{T_m^{i+1} - T_m^i}{\Delta t} \quad (21)$$

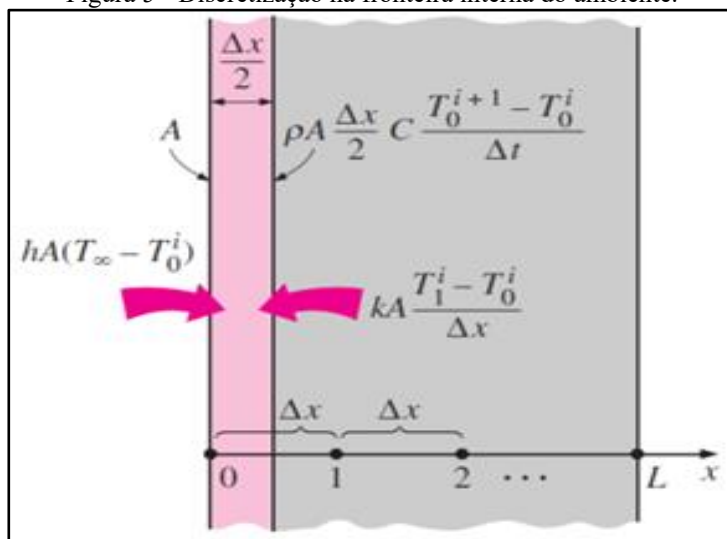
Tem-se:

$$T_m^{i+1} = (k_1(T_{m-1} - T_m) + k_2(T_{m+1} - T_m)) \frac{\Delta t}{\Delta x^2 \rho_1 C_{p1} + \rho_2 C_{p2}} + T_m^i \quad (22)$$

2.3.5 Para o nó de fronteira com a 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 adaptado pelo autor

$$h_A (T_\infty - T_0^i) + k.A. \frac{T_1^i - T_0^i}{\Delta x} = \rho.A. \frac{\Delta x}{2} c_p \frac{T_0^{i+1} - T_0^i}{\Delta t} \quad (23)$$

Multiplicando por

$$\left(\frac{2\Delta x}{k.A} \right) \Rightarrow \frac{2h\Delta x}{k} (T_\infty - T_0^i) + 2. (T_1^i - T_0^i) = \frac{\rho.\Delta x^2}{k} c_p \frac{T_0^{i+1} - T_0^i}{\Delta t} \quad (24)$$

Para: $\alpha = \frac{k}{\rho.c_p} \Rightarrow \frac{2h\Delta x}{k} (T_\infty - T_0^i) + 2.(T_1^i - T_0^i) = \frac{\Delta x^2}{\alpha\Delta t} (T_0^{i+1} - T_0^i)$ (25)

Fazendo $(\tau = \frac{\alpha\Delta t}{\Delta x^2})$, temos $\Rightarrow \frac{2h\Delta x}{k} (T_\infty - T_0^i) + 2.(T_1^i - T_0^i) = \frac{T_0^{i+1} - T_0^i}{\tau}$ (26)

Organizando: $T_0^{i+1} - T_0^i = \tau \left[\frac{2h\Delta x}{k} (T_\infty - T_0^i) + 2. (T_1^i - T_0^i) \right]$ (27)

Isolando o termo de interesse:

$$T_0^{i+1} = (T_0^i - 2.\tau.T_0^i - \tau.T_0^i \frac{2h\Delta x}{k}) + 2.\tau.T_1^i + 2.\tau.\frac{h\Delta x}{k}.T_\infty \quad (28)$$

Que na forma simplificada fica:

$$T_0^{i+1} = (1 - 2\tau \cdot \tau \cdot \frac{2h\Delta x}{k}) \cdot T_0^i + 2\tau \cdot T_1^i + 2\tau \cdot \frac{h\Delta x}{k} \cdot T_\infty^i \quad (29)$$

Diante da discretização apresentada, temos a equação (17) para os nós internos, a equação (19) representa o nó externo ou de fronteira, a equação (22) representa os nós de fronteira entre camada e a equação (29) representa o nó de fronteira da face interna, que foram aplicadas no algoritmo para a simulação numérica.

2.4 CRITÉRIO DE ESTABILIDADE

A implementação do método explícito é mais fácil e rápida de ser realizada, porém para sua utilização, deve-se considerar o critério de estabilidade. E, uma vez que é determinado o número de pontos e um espaçamento uniforme entre os nós consecutivos, o passo de tempo deve satisfazer a seguinte relação:

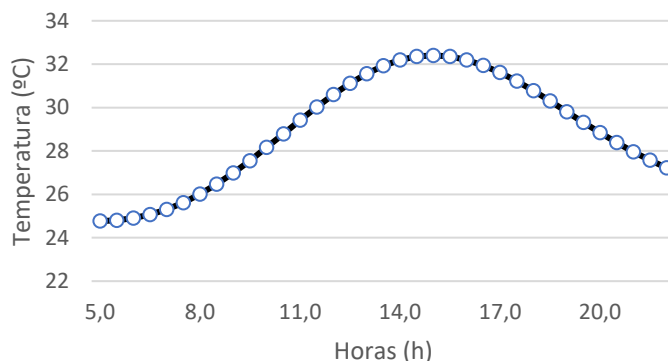
$$\Delta t \leq \frac{1}{2} \frac{\Delta x^2}{\alpha}, \alpha = \frac{k}{\rho C} \quad (30)$$

Sendo assim a relação estabelecida no algoritmo entre os espaços dos nós pela difusividade e o passo de tempo está dentro dos níveis aceitáveis para o critério de estabilidade.

2.5 MODELO CLIMÁTICO PARA SÃO LUÍS

O modelo utilizado neste trabalho para a temperatura ambiente ao longo das horas do dia para a cidade de São Luís foi desenvolvido por CARVALHO FILHO (2016, p. 32-35) que fez uso dos dados meteorológicos proveniente do banco de dados do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) e é mostrado na figura 6.

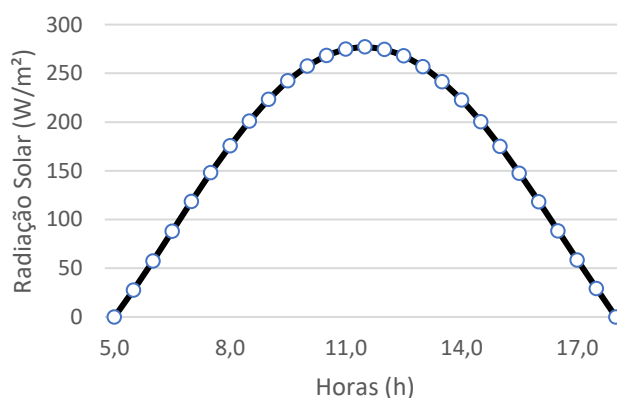
Fig. 6 - Temperatura horária com base no Modelo da ASHRAE e os dados do INMET para o dia 02/12/2017.



Fonte: Carvalho Filho (2016, p. 35).

Para a intensidade da irradiação solar horária foi utilizado a metodologia desenvolvida por CARVALHO FILHO (2016, p. 31) que fez uso do software RADIASOL2. Assim, a soma da componente da radiação difusa e da radiação incidente na parede inclina é dada por polinômio de ajuste para os dados meteorológicos cujo gráfico é mostrado a seguir.

Fig. 7 - Radiação solar na parede ao longo do dia.



Fonte: Carvalho Filho (2016, p. 31).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

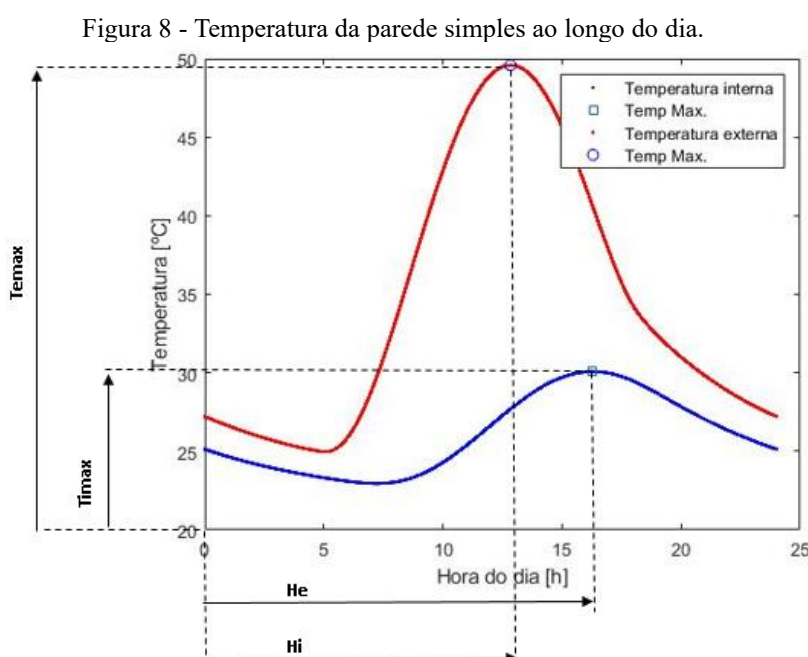
Foram realizadas diversas simulações numéricas para avaliar os efeitos da variação da espessura da camada interna e os efeitos dos diferentes tipos de materiais que podem ser aplicados para fins de comparação com o PET. Os dados de radiação solar e temperatura ambiente foram obtidos do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia), como mostrado no item anterior (2.5). Foi utilizado para estas simulações um valor de 0,15 W/m.K para a condutividade térmica do PET, bem como uma massa específica de 1350 Kg/m³, calor específico de 1275 J/Kg.K, dados de k obtidos em outro projeto experimental e os demais, obtidos pelo GOODFELLOW, provedor global de materiais e do PROTOLAB.

3.1 PAREDE SIMPLES DE ALVENARIA E PAREDE COMPOSTA DE PET

Inicialmente foi realizada a simulação com uma parede simples de tijolo cerâmico comum de 15cm de espessura, sendo 10cm de do bloco de alvenaria e 2,5cm de cada lado de reboco com condutividade térmica de 0,72 W/m.K, massa específica de 1922 Kg/m³, calor específico de 835 J/Kg.K, além de absorvidade de 0,63 e emissividade de 0,93.

Na Figura 8 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 $RET = 3,30h$.



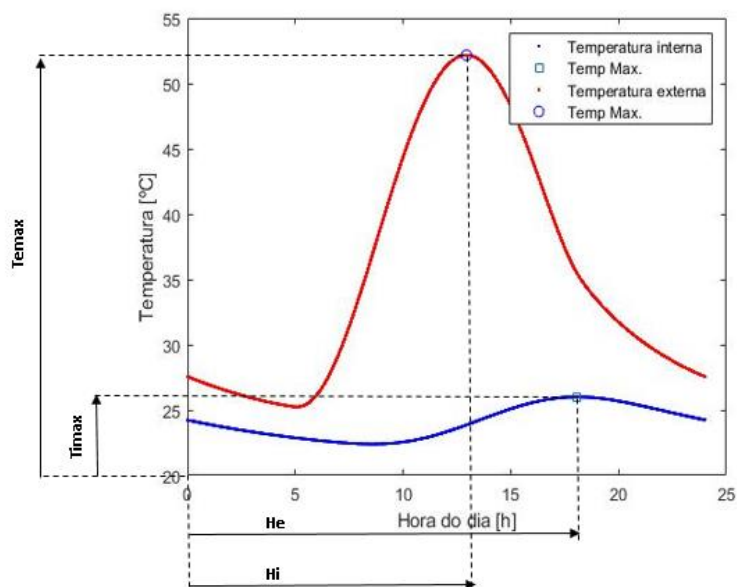
Fonte: Autor, 2020.

Em outra simulação, para a parede composta com PET, foi considerado 5cm de alvenaria nas camadas externas e 5cm na camada interna de PET, totalizando 15cm.

Na figura 9 a temperatura máxima da parede externa foi de 52,19 °C, ocorrendo próximo as 13:00h, já a temperatura interna máxima foi de 26,02 °C próximo as 18:00h. Os valores obtidos foram:

$RT^*=0,499$ e $RET=5,00$. Podendo-se observar uma temperatura interna máxima bem menor e um retardamento de pico bem maior em relação a parede simples de alvenaria da Figura 8.

Figura 9 - Temperatura da Parede mista de PET ao longo do dia.



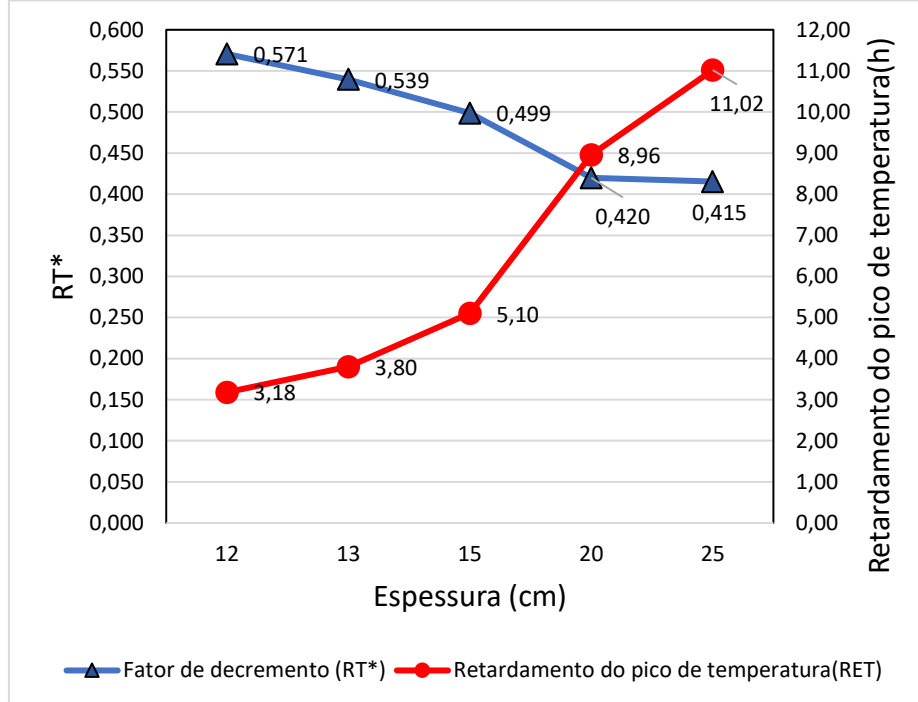
Fonte: Autor, 2020.

3.2 VARIAÇÃO DA ESPESSURA INTERNA DA PAREDE MISTA COM PET

Para essas simulações, foram utilizadas as mesmas condições das feitas acima, apenas variando a espessura interna onde se encontram o PET.

Na Figura 10, para o fator de decremento RT^* , é possível observar 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).

Figura 10 - Efeito da variação da espessura da parede composta nos valores de RT* e RET.



Fonte: Autor, 2020.

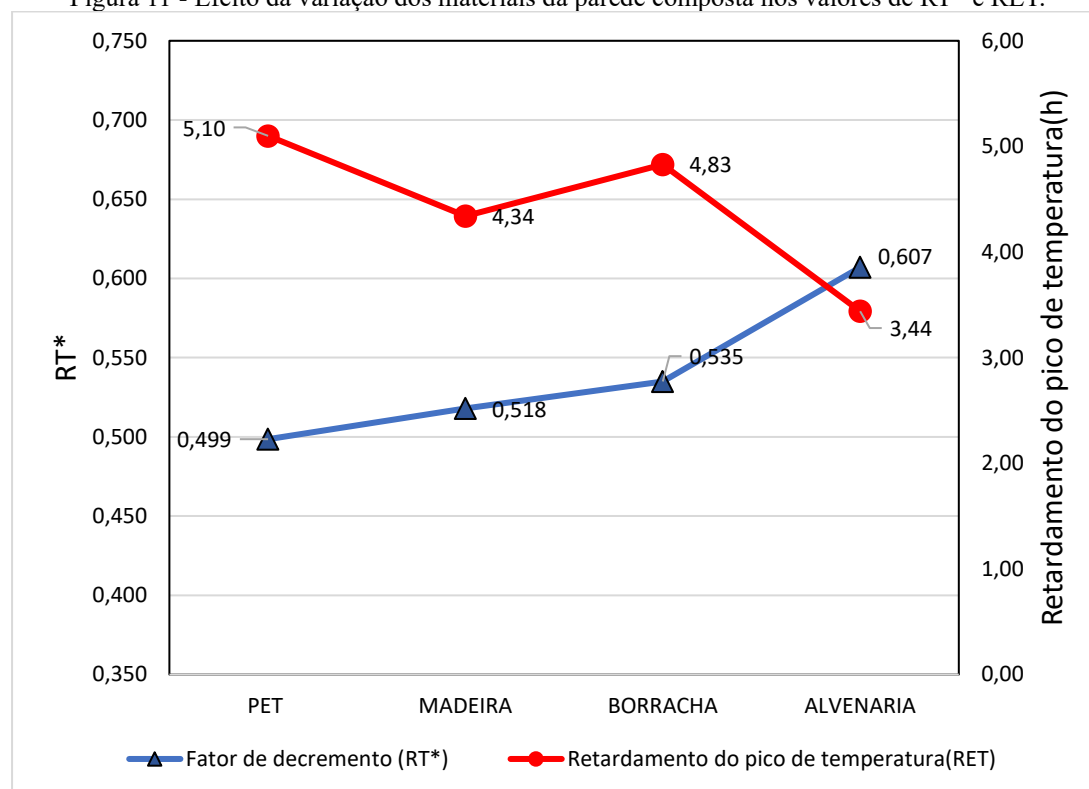
3.3 VARIAÇÃO DOS MATERIAIS UTILIZADOS

Para esta simulação, com a parede composta de mesma espessura, foram analisados quatro tipos de materiais diferentes: Pet e alvenaria já simulados anteriormente, a 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 por fim a borracha com condutividade térmica de 0,25 W/m.K, massa específica de 1100 Kg/m³ e calor específico de 2010 J/Kg.k.

Na Figura 11, podemos analisar que os materiais estão organizados de forma crescente em relação a condutividade térmica, da esquerda para 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*).

Os valores considerados para a condutividade térmica dos materiais simulam paredes compostas com características de materiais isolantes, com baixa condutividade, sendo mal condutores de calor. Já a parede considerando apenas alvenaria, que só leva materiais de construções convencionais possui uma condutividade térmica relativamente alta.

Figura 11 - Efeito da variação dos materiais da parede composta nos valores de RT^* e RET.



Fonte: Autor, 2020.

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 consequentemente, reduzindo o uso de aparelhos de ar condicionados e ventiladores.

A utilização de outros tipos de materiais nas construções civis pode 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 consequentemente, aumentando os gastos com energia elétrica devido ao uso de ar condicionados.

Diante dos resultados expostos, podemos considerar que a camada de PET foi fundamental no isolamento térmico da parede composta, mostrado nas Figuras 8 e 9 em comparativo com a alvenaria convencional uma redução na carga térmica de **17,79%**, onde a parede simples de alvenaria obteve-se um $RT^* = 0,607$ e a PET um $RT^* = 0,499$.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15220. Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.

CARVALHO FILHO, A. de F. Modelagem e Simulação de um Sistema de Refrigeração por Adsorção à Energia Solar Utilizando Carvão Ativado e Etanol Como par Adsorativo. Monografia (Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual do Maranhão, São Luis, Maranhão, 2016.

COUTINHO, Antonio Souto. Conforto e Insalubridade Térmica em Ambiente de Trabalho. 2. ed. João Pessoa: Editora Universitária, 2005.

CREDER, Hélio. Instalações de Ar Condicionado. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2004. 318 p.

ÇENGEL, Y. A.; AFSHIN, J.G. Transferência de Calor e Massa: Uma Abordagem Prática. Porto Alegre: Editora McGraw-Hill, 2012. 904 p.

FANGER, P.O. Thermal Comfort. New York: McGraw-Hill Book Company, 1970.

GOODFELLOW. Provedor global de materiais. Disponível em: <http://www.goodfellow.com/S/Politereftalato-de-Etileno.html>. Acesso em: 15 jul. 2020.

INCROPERA, F. P.; BERGMAN, T. L.; DEWITT, D. P. Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 6. ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2008.

ISMAIL, K. A. R. ‘Banco de gelo’ economiza energia ao armazenar frio. Jornal da Unicamp, Campinas, p. 8, 5 out. 2003.

PROTOLAB. Tabela de condutividade térmica de materiais de construção. Disponível em: <http://www.protolab.com.br/Tabela-Conductividade-Material-Construcao.htm>. Acesso em: 5 jan. 2020.

SOUSA, Vivian Aparecida Lima. Estudo do Comportamento de Materiais Não Convencionais Utilizados Como Revestimento de Paredes, Visando à Redução da Carga Térmica. Tese de Mestrado. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

VITTORINO, F.; SATO, N. M. N.; AKUTSU, M. Desempenho térmico de isolantes refletivos e barreiras radiantes aplicados em coberturas. In: Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído, 2003, Curitiba, Paraná. ENCAC, p. 1277-1284.