



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE ANGICOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIAS
CURSO DE BACHARELADO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA

GLAYVISON EDUARDO DA SILVA FELIX

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA ARGAMASSA COM
AGREGADO DE VERMICULITA EXPANDIDA POR MEIO DE SIMULAÇÕES
NUMÉRICAS.**

ANGICOS – RN

2019

GLAYVISON EDUARDO DA SILVA FELIX

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA ARGAMASSA COM
AGREGADO DE VERMICULITA EXPANDIDA POR MEIO DE SIMULAÇÕES
NUMÉRICAS.**

Monografia apresentada a Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Bacharel em ciência e tecnologia.

Orientador: Prof. Dr. Wendell Rossine Medeiros de Souza.

ANGICOS - RN

2019

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996, e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

D316a DA SILVA FELIX, GLAYVISON EDUARDO .
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA ARGAMASSA
COM AGREGADO DE VERMICULITA EXPANDIDA /
GLAYVISON EDUARDO DA SILVA FELIX. - 2019.
47 f. : il.

Orientador: WENDELL ROSSINE MEDEIROS DE SOUZA.
Monografia (graduação) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Curso de Ciência e
Tecnologia, 2019.

1. Conforto Térmico. 2. Comportamento térmico.
3. ADINA. 4. Método dos elementos finitos . I.
MEDEIROS DE SOUZA, WENDELL ROSSINE , orient. II.
Título.

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

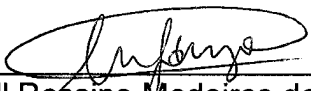
GLAYVISON EDUARDO DA SILVA FELIX

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO TÉRMICO DA ARGAMASSA COM
AGREGADO DE VERMICULITA EXPANDIDA POR MEIO DE SIMULAÇÕES
NUMÉRICAS.**

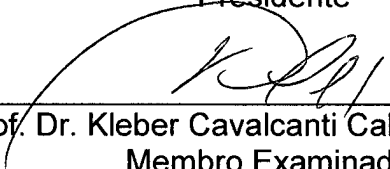
Monografia apresentada a Universidade
Federal Rural do Semi-Árido como
requisito para obtenção do título de
Bacharel em ciência e tecnologia.

Defendida em: 14 / 08 / 2019.

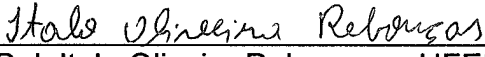
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Wendell Rossine Medeiros de Souza - UFERSA
Presidente



Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral - UFERSA
Membro Examinador



Bel. Italo Oliveira Rebouças - UFERSA
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a **Deus**, por me dar força em todos momentos e por tudo o que conquistei e irei conquistar.

Agradeço ao meu pai **Gilvani**, por ser esse homem trabalhador. Que sempre trabalhou duro para que eu pudesse realizar meus sonhos. Admiro muito o senhor.

À minha vó **Lucimar**, por ter sempre lutado para que nunca faltasse nada para mim, a qual me criou e educou deste de pequeno, mesmo sendo difícil, você nunca desistiu, sinto muito orgulho e admiração por você.

À minha avó **Maria Dulce**, por ser a pessoa que mais me apoia e me entende, sempre me incentivando em meus estudos. Serei sempre grato por todo amor e carinho que a senhora me dar. Amo muito a senhora.

Agradeço aos meus familiares e amigos que sempre torceram e acreditaram em meu sucesso, me apoiando em todas as decisões difíceis e que sempre me deram todo o suporte necessário para a realização dos meus estudos.

Ao meu orientador, **Wendell Rossine** a quem teve paciência comigo, me dando sempre atenção e incentivos para que esse trabalho tivesse sucesso. Nesta reta final, sempre estando disponível para que desse certo. Obrigado por tudo e foi um prazer trabalhar com o senhor.

Agradeço à Banca Examinador, **Prof. Dr. Kleber Cavalcanti Cabral** e ao **Bel. Italo Oliveira Rebouças**

À minha namorada **Danielle costa** Além do meu amor, minha amiga e minha conselheira. A quem está sempre me ouvindo e dando forças para que consiga alcançar meus objetivos.

Aos meus queridos professores, em especial a **Nubia, Klaus, Janaina, Cíntia** e **Luiz**. Pelo conhecimento repassado para mim, as quais admiro como profissionais e principalmente como pessoas. Contribuíram bastante para a minha vida acadêmica e formação, me dando ótimos exemplos de qual tipo de profissional quero ser.

Aos meus amigos da UFERSA, que no decorrer desses 3 anos me ajudaram a crescer muito como pessoa.

A “casa sem nome” por todos os momentos de alegria.

Por fim, agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, e que me deram o apoio necessário para a conquista de mais essa etapa em minha vida. Muito obrigado.

“Viver é enfrentar um problema atrás do outro. O modo como você o encara é que faz a diferença. ”

Benjamin Franklin

RESUMO

Pelo fato do território brasileiro em boa parte do ano sofrer com altas temperaturas, devido ao clima tropical, desmatamento, efeito estufa e aumento das ilhas de calor, situações que levam a redução do conforto térmico nas residências, a vermiculita surge na história, como agregado de ótimas características termoacústicas sendo implementado na argamassa para uso em reboco, emboço e outras utilidades. Com propósito de amenizar os efeitos desfavoráveis de forma passiva, buscando reduzir as temperaturas no ambiente interno. O trabalho consiste na elaboração de 5 modelos, possuindo geometrias idênticas de 2,0 x 29,5cm, onde cada modelo possui níveis de substituição do agregado miúdo diferentes. Com valores de 0, 25, 50, 75 e 100%. Submetidos a um carregamento de fluxo de calor em que consiste em uma rampa com acréscimo de 19,8 J/m²min após 10 minutos, o valor fica constante até o fim da simulação. Além do fluxo de calor, o modelo está sujeito a trocas de calor por radiação e convecção instalados em um ambiente de 30°C. A simulação tem duração de 90 minutos, com dados obtidos de uma linha modelo. Os resultados ficaram claros que houveram uma redução de temperatura no interior, que se intensificaram com o aumento de vermiculita. Porém na linha modelo, foi observado uma tendência das cargas laterais se concentrarem no centro. Chegando a valores consideráveis de até 13,6°C de variação se comparado com o desempenho da argamassa referência.

Palavras-chave: Conforto térmico; Comportamento térmico; ADINA; método dos elementos finitos.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Zoneamento Bioclimático Brasileiro.....	19
Figura 2	–	Vermiculita em estado laminar/ Expandida.....	23
Figura 3	–	Elemento Planar em A) 2D e B) 3D	25
Figura 4	–	Coordenas dos pontos do modelo base.....	26
Figura 5	–	Definição da superfície do modelo base.....	27
Figura 6	–	Definição da linha modelo.....	30
Figura 7	–	Matriz de resultados.....	31
Figura 8	–	Distribuição de temperatura no corpo-de-prova com 0% de substituição.....	33
Figura 9	–	Distribuição de temperatura no corpo-de-prova com 25% de substituição.....	35
Figura 10	–	Distribuição de temperatura no corpo-de-prova com 50% de substituição.....	36
Figura 11	–	Distribuição de temperatura no corpo-de-prova com 75% de substituição.....	38
Figura 12	–	Distribuição de temperatura no corpo-de-prova com 100% de substituição.....	39
Figura 13	–	Variação de temperatura versus tempo obtido por Barros.....	41

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	–	Decomposição de consumo final de eletricidade em 2017.....	17
Gráfico 2	–	Função tempo do fluxo de calor.....	28
Gráfico 3	–	Perfil térmico do modelo 1.....	34
Gráfico 4	–	Perfil térmico do modelo 2.....	35
Gráfico 5	–	Perfil térmico do modelo 3.....	37
Gráfico 6	–	Perfil térmico do modelo 4.....	38
Gráfico 7	–	Perfil térmico do modelo 5.....	40
Gráfico 8	–	Variação de temperatura em relação ao tempo.....	41

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Lista de modelos	16
Tabela 2	– Propriedades de simulação dos materiais presentes nos modelos.....	21

LISTA DE SIMBOLOS, SIGLAS E ABREVIACES

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
ε	Emissividade
σ	Constante de Stephan-Boltzmann
%	Porcentagem
A	Área da seo através da qual o calor flui por conduo
ABNT	Associao Brasileira de Normas técnicas
Al	Alumínio
ASHRAE	American Society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers
Bel	Bacharel
Dr	Doutor
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
Fe	Ferro
K	Condutividade térmica
Me	Mestre
Mg	Magnésio
Min	Minutos
NBR	Normas Brasileiras
O	Oxignio
OH	Hidroxila
q_k	Fluxo de calor
q_r	Calor emitido por irradiao
S	Segundos
Si	Silício
S.I	Sistema Internacional de unidades
T_1	Temperatura do corpo que está posicionado externamente
T_2	Temperatura do corpo que está posicionado internamente
T_a	Temperatura do ambiente
T_{RM}	Temperatura radiante média
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
U_R	Umidade Relativa
V_r	Velocidade relativa do ar

W

Watts

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
1.1. JUSTIFICATIVA	16
1.2. OBJETIVOS	17
1.2.1. OBJETIVOS GERAL	17
1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1. CONFORTO TÉRMICO	18
2.2. PROPRIEDADES TÉRMICAS	19
2.2.1. CONDUTIVIDADE TÉRMICA	19
2.2.2. CAPACIDADE CALORÍFICA	20
2.2.3. DIFUSIVIDADE TÉRMICA	20
2.3. MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	20
2.3.1. CONDUÇÃO	20
2.3.2. CONVECÇÃO	21
2.3.3. RADIAÇÃO	21
2.4. VERMICULITA	22
2.5. ARGAMASSA DE VERMICULITA	23
3. METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO	24
3.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS	24
3.2. DESCRIÇÃO DOS MODELOS	24
3.3. GEOMETRIA DO MODELO	25
3.4. CARREGAMENTO	27
3.5. MODELOS E MATERIAS	28
3.6. MALHA E LIMITES DE FRONTEIRA	29
3.7. SIMULAÇÃO	29
4. RESULTADOS E SIMULAÇÃO	32
4.1. MODELO 1 – 0%	32
4.2. MODELO 2 – 25%	34
4.3. MODELO 3 – 50%	36
4.4. MODELO 4 – 75%	37

4.5. MODELO 5 – 100%.....	39
4.6. RESULTADOS GERAIS	40
5. CONCLUSÃO.....	42
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1. INTRODUÇÃO

Com o decorrer dos anos, veio a necessidade da busca por materiais de construção que trouxessem maiores benefícios como, resistência, durabilidade, melhor aparência e maior trabalhabilidade, dentre outras características, que são desenvolvidas graças aos avanços tecnológicos, pesquisas científicas, resultando em novos materiais, novas técnicas construtivas, aliando segurança com preço otimizados (CARDOZO,2018).

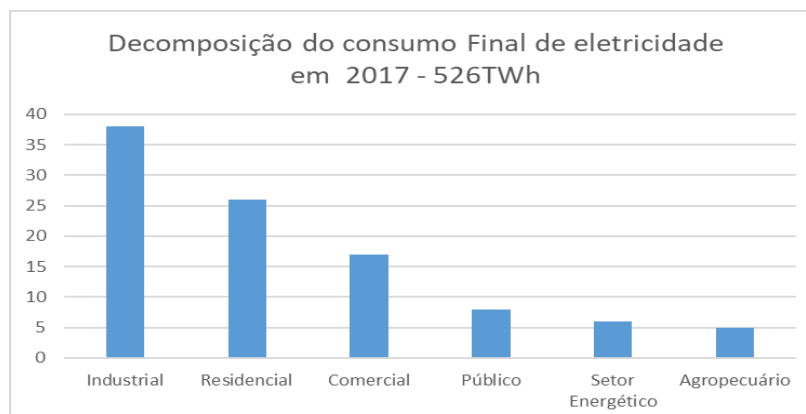
Com foco nesses requisitos, diversas pesquisas e normas têm sido desenvolvidas a fim de obter revestimentos que tragam conforto térmico e acústico com maior eficiência energética e de forma sustentável. Ora, o isolamento térmico, por si só, contribui para a eficiência energética e, conseqüente, para a sustentabilidade. Entretanto, a eficiência e a sustentabilidade podem ser otimizadas pelo uso de materiais alternativos de mais baixo custo, materiais reciclados, ou de fontes renováveis.

1.1. JUSTIFICATIVA

Em virtude de o Brasil sofrer com altas temperaturas durante o ano inteiro e com o efeito estufa esse valor só tende de aumentar, somando-se com a escassez de chuva nas cidades. Provocando um clima seco, acabando assim, utilizando muitos equipamentos térmicos para promover um conforto térmico nas residências.

Sendo assim, cria-se uma busca por eficiência energética nas residências ou prédios comerciais. Uma via para se alcançar esse objetivo é a criação de novos materiais para conforto térmico, além de combater o preço da conta de energia, devido os equipamentos térmicos como ventiladores, ar-condicionado e similares que teriam de trabalhar em maior potência para equilibrar o ambiente em uma temperatura confortável.

Gráfico 1: Decomposição de consumo final de eletricidade em 2017.



Fonte: Adaptado do Uso de Ar condicionado no setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para avanço em eficiência energética (EPE, 2018).

Observando o Gráfico 1, percebe-se que o setor de edificações (residencial, comercial, público) apresenta valor expressivo de consumo de 51%, tendo o setor residencial responsável por volta de 26% do consumo total da eletricidade no país. Que dessa fatia foram gastos aproximadamente 15% com ar condicionado (EPE, 2018).

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. OBJETIVOS GERAL

A intenção desta pesquisa é analisar a utilização de argamassa com substituição de areia por vermiculita como material para reboco e emboço, dentre outras utilidades, devido às características presentes na vermiculita.

Analisando desempenho térmico da argamassa com agregado de vermiculita expandida por método de elementos finitos, visando o aumento no conforto térmico de residências e de prédios comerciais.

1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o comportamento térmico de placas de argamassa com substituição de areia por argamassa com dimensões de 34x 29,5 x2 cm.
- Comparação de desempenho térmico para substituição 0, 25, 50, 75, 100 da porcentagem de areia na argamassa.

- Comparar com os dados obtidos por Barros.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

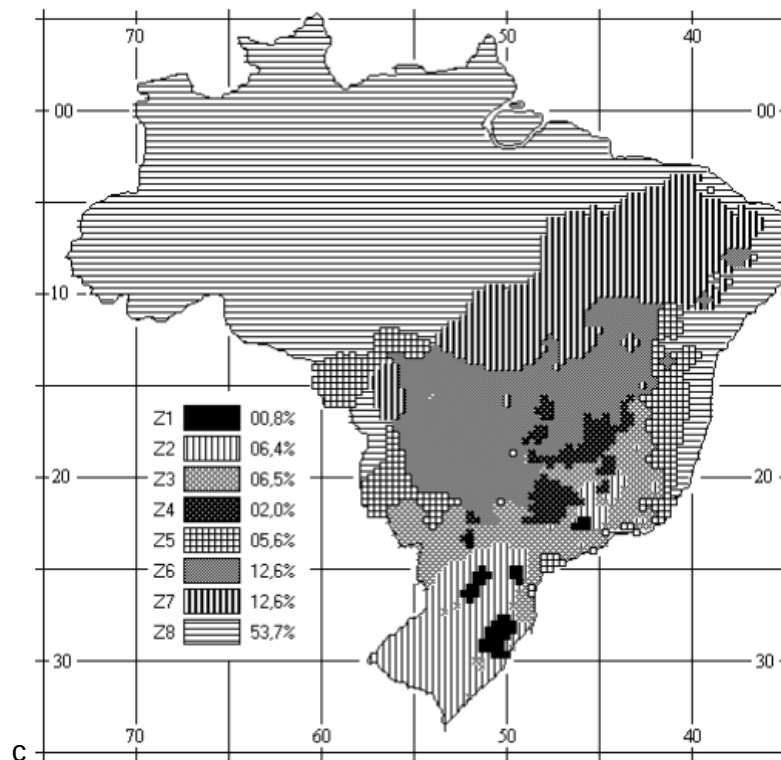
2.1. CONFORTO TÉRMICO

“Conforto térmico é o estado da mente que expressa satisfação do homem com o ambiente térmico que o circunda” ASHRAE (American Society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers). Podendo ser expressa como resultado da combinação da temperatura radiante média (T_{RM}), umidade relativa (U_R), temperatura do ambiente (T_A) e velocidade relativa do ar (V_R) com a atividade lá desenvolvida e com a vestimenta usada pelas pessoas neste ambiente.

As sensações são subjetivas, podendo variar essa sensação térmica dependendo da pessoa. Devido a doença, estado emocional ou/e por aclimação, Ruas (1999) explica que, um certo ambiente, termicamente falando, poderá ser expresso por uma pessoa como quente e por outra como “frio”. Assim, entende-se como um ambiente de condições térmicas confortável, um local que propicia bem-estar ao maior número possível de pessoas.

Segundo a NBR 15575 (ABNT, 2013), as Habitações unifamiliares devem apresentar características que atendam às exigências de desempenho térmico, considerando-se a zona bioclimática a qual a edificação reside. O zoneamento ilustrado na figura 2, propõe uma divisão do território brasileiro em oito diferentes zonas relativamente homogêneas em correlação com o clima. A figura delimita a localização e seus percentuais de área em relação à área total do território brasileiro, sendo descrita na NBR 15220.

Figura 1: Zoneamento Bioclimática Brasileiro.



Fonte: ABNT NBR 15220-3 (ABNT, 2003)

Além do zoneamento bioclimático brasileiro, a NBR 15220 (ABNT, 2003) define diretrizes construtivas e detalhamento de estratégias para combater de forma passiva as altas temperaturas.

Devido o objetivo desse estudo. Terá como zonas principais a Z7 e Z8, correspondendo a uma cobertura de 66,3% do território brasileiro. Sendo tratado a utilização de novos materiais construtivo para vedação.

2.2. PROPRIEDADES TÉRMICAS

2.2.1. CONDUTIVIDADE TÉRMICA

“A condutividade térmica (k) é uma propriedade material que indica a quantidade de calor que fluirá por unidade de tempo através de uma unidade de área quando o gradiente de temperatura for unitário” (KREITH; FRANK, 1922, p.4). Portanto, a condutividade térmica no SI é expressa em unidade de watts por metro por kelvin (W / mK).

2.2.2. CAPACIDADE CALORÍFICA

Segundo Callister Jr (2002), Capacidade térmica ou calorífica (C) é uma propriedade térmica de um corpo, que define quanto de calor absorvido será necessário para que o corpo sofra um aumento unitário de temperatura. Capacidade térmica no SI é expressa em unidade de Joule por Kelvin (J/K).

2.2.3. DIFUSIVIDADE TÉRMICA

A difusividade Térmica (α) é uma propriedade do material, que expressa a velocidade ao qual o calor difunde através do material. Podendo-se ser interpretada como a razão entre o calor de condução e calor armazenado (ÇENGEL, GHAJAR, 2012, p.24). Difusividade térmica no SI é expressa em unidade de metro ao quadrado por segundo (m^2/s).

2.3. MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Sempre que existir um gradiente de temperatura dentro de um sistema ou dois corpos em diferentes temperaturas forem colocados em contato, haverá transferência de energia térmica (KREITH; FRANK, 1922). Há três mecanismos de transferência de calor que são: condução, radiação e convecção.

2.3.1. CONDUÇÃO

Condução é a transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para partículas vizinhas adjacentes menos energéticas, como resultado da interação entre elas. A condução pode ocorrer em sólidos, líquidos ou gases” (ÇENGEL, GHAJAR, 2012, p.17). Podendo ocorrer entre duas regiões em um mesmo meio ou entre dois meios em contato direto. Sendo mais frequente nos sólidos.

Segundo Barrosa (2004), a energia do corpo de temperatura mais alta agita as moléculas do corpo de temperatura mais baixa, fazendo com que a energia cinética média das moléculas deste último se eleve, aumentando, assim, sua energia interna.

A lei de Condução Térmica, ou lei de Fourier, em homenagem ao físico e matemático, J.B.J Fourier, em 1882, estabeleceu que o fluxo de calor por um meio homogêneo é.

$$q_k = -kA \frac{dT}{dx}$$

Sendo:

q_k = Fluxo de calor (W/m²);

k = Condutividade térmica do material (W/mk);

A = Área da seção através da qual o calor flui por condução (medida perpendicularmente a direção do fluxo) (m²);

$\frac{dT}{dx}$ = Gradiente de temperatura na seção (K/m);

O sinal negativo deve-se em consequência da segunda lei da termodinâmica, que requer que o calor flua da região de maior temperatura para a de menor temperatura.

2.3.2. CONVECÇÃO

A convecção é o segundo modo de transferência de energia entre a superfície sólida e a líquida ou gás adjacente, consistindo em dois mecanismos diferentes operando simultaneamente.

Como explica Kreith, (1922), o primeiro modo é o condutivo, que ao transmitir energia via movimento molecular, e sobreposta a ela está a transferência de energia térmica mediante a movimento macroscópico de parcelas do fluido, a qual constituem um grande número de moléculas, que se movem em razão de uma força externa. “Essa força pode ser provocada por um gradiente de densidade, como na convecção natural, ou por uma diferença de pressão gerada por uma bomba ou ventoinha, ou possivelmente uma combinação dos dois” (KREITH; FRANK, 1922, p.14).

2.3.3. RADIAÇÃO

“Radiação é a energia emitida pela matéria sob a forma de ondas eletromagnéticas (ou fótons) como resultado das mudanças nas configurações eletrônicas de átomos ou moléculas” (ÇENGEL, GHAJAR, 2012, p.27). Ao contrário

dos outros mecanismos de transferência de energia térmica, a radiação não necessita de um meio físico entre os corpos para que a energia seja transmitida.

Segundo Barrosa (2004), Todos os materiais que possuem temperaturas diferente do zero absoluto emitem radiação térmica, porém, dependendo da composição química ou de outros requisitos a emissividade (ε) poderá variar entre 0 e 1. Os corpos com emissividade igual a 1, são chamados de irradiadores perfeitos, ou corpos negros.

Porém na prática, os corpos reais não atendem às especificações de um irradiador perfeito, assim, emitindo radiação a uma taxa mais baixa que a dos corpos negros. (KREITH; FRANK, 1922); essa taxa pode-se calcular pela lei de Kirchhoff:

$$q_r = \varepsilon A \sigma (T_1^4 - T_2^4)$$

Onde:

q_r = Calor emitido por irradiação (J);

ε = Coeficiente de emissividade do material;

A = Área total da superfície (m²);

σ = Constante de Stephan-Boltzmann, onde $\sigma = 5,669 \times 10^{-8}$ (W/m²°K⁴);

T_1 = Temperatura do corpo que está posicionado externamente (K);

T_2 = Temperatura do corpo que está posicionado internamente (K);

2.4. VERMICULITA

A vermiculita é um silicato hidratado de magnésio, alumínio e ferro, com uma estrutura micáceo-lamelar e clivagem basal, podendo-se dizer que é uma mica inteiramente hidratada, pois geologicamente se forma no final das micas flogopita ou biotita, após a lixiviação dos álcalis. Possui uma composição química expressa por $(\text{Mg, Fe})_3 [(\text{Si, Al})_4 \text{O}_{10}] [\text{OH}]_2 4\text{H}_2\text{O}$.

A vermiculita, é composta estruturalmente por camadas intercaladas de lamelares de silicatos e água. Ela possui uma propriedade de expansão, quando

aquecida a temperaturas de 650 e 1000°C ocorre uma brusca transformação da água em vapor; a pressão exercida pelo vapor promove um afastamento das lamelas e uma deformação axial do mineral (FRANÇA e LUZ, 2002).

“O mineral comercializado na forma expandida possui propriedades como baixos valores de massa específica aparente e de condutividade térmica. ” (UGANTE, SAMPAIO, FRANÇAS, 2005, p.678)

Segundo Cintra (2013), a vermiculita expandida é um material inerte, inodora, não apodrece, tem propriedades lubrificantes e não oferece riscos à saúde, podendo ser encontrado comercialmente em diferentes tamanhos. É utilizado na indústria agrícola, horticultura e na construção civil.

Figura 2: Vermiculita em estado laminar/ Expandida



Fonte: Brasil Minérios (2018)

2.5. ARGAMASSA DE VERMICULITA

Segundo Rashad (2016), a incorporação de vermiculita expandida na mistura de argamassa produz um aumento na trabalhabilidade, este aumento poderia estar relacionado com o aumento do conteúdo de ar da mistura.

Devido à alta presença de vazios existente na vermiculita expandida, provoca uma redução na densidade da argamassa e um aumento nas características isolantes, dando-se assim a utilização para reboco isolante termoacústico, contrapiso e enchimento de caixões perdidos, para proteção de lajes de cobertura e revestimento passivo contra incêndio (PESSATTO, 2005).

De acordo com Klyusov, Fattakhov, citado por BARROS (2018, p.16) “relataram que a adição de vermiculita expandida em pastas de cimento previne a

retração do cimento durante o período de cura, aumentando também a resistência a cargas dinâmicas e térmicas, o que promove um bom isolamento. ”

3. METODOLOGIA DE SIMULAÇÃO

3.1. MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

A metodologia consistiu em uma modelagem computacional através do método de elementos finitos, com o auxílio do software ADINA Versão 9.4, capaz de simular numericamente as situações desejadas.

A análise foi realizada com o auxílio do modulo ADINA Thermal, que permite a análise com adição de cargas térmicas.

3.2. DESCRIÇÃO DOS MODELOS

Durante o trabalho foram construídos 5 corpos de prova. O que os diferencia entre eles é apenas a substituição de areia por vermiculita. Expondo eles a um aumento de fluxo de calor com tempo de duração de 90 minutos.

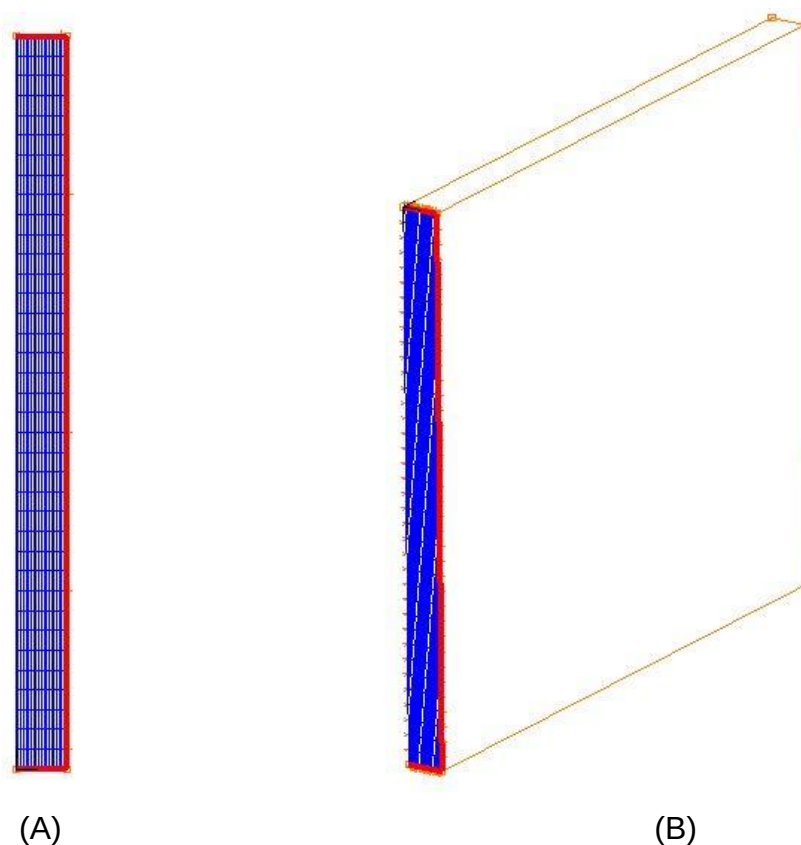
O corpo-de-prova foi simulado utilizando um modelo de sólido em duas dimensões planar que representa um elemento retangular, conforme a Figura 5, de forma que o comprimento fosse unitário, assim dispensando o modelo 3D que traria limitações, pois facilmente chegaria aos 900 nodes que a versão permite.

Tabela 1: Lista de modelos criados

MODELOS	SUBSTITUIÇÃO DE AREIA POR VERMICULITA (%)
M1	0
M2	25
M3	50
M4	75
M5	100

Fonte: Autoria Própria (2019)

Figura 3: Elemento Planar em A) 2D e B) 3D



Fonte: Adaptado do ADINA R & D, INC (2019).

3.3. GEOMETRIA DO MODELO

O modelo base apresenta geometria retangular em 2D, possuindo 2 cm de largura e 29,5 cm de altura. Tendo sua origem (0,0) no canto esquerdo inferior. Com base nisto foram definidos os pontos, como descreve a Figura 4.

Figura 4: Coordenadas dos pontos do modelo base.

Geometry Points ✕

Save Discard OK

Method: Define By Coordinates << click Discard to re-activate Cancel

Default Coordinate System: 0 ...

Auto... Import... Export... Clear Del Row Ins Row Help

	Point #	X1	X2	X3	System
1	1		0.02	0	
2	2		0.02	0.295	
3	3		0	0.295	
4	4		0	0	
5					
6					
7					
8					
9					
10					

Fonte: Adaptado do ADINA R & D, INC (2019).

Após os pontos serem definidos, foi estabelecido a superfície sólida, conforme mostra a Figura 5.

Figura 5: Definição da superfície do modelo base.

Define Surface

Add... Delete Copy... Save Discard

☐ Delete Lines/Points when Surface is Deleted

Surface Number: 1 P Type: Vertex

Vertices

Point 1: 1 P

Point 2: 2

Point 3: 3

Point 4: 4

Note: Specify Point 4 = Point 1 for Triangular Surface.

OK Cancel Help

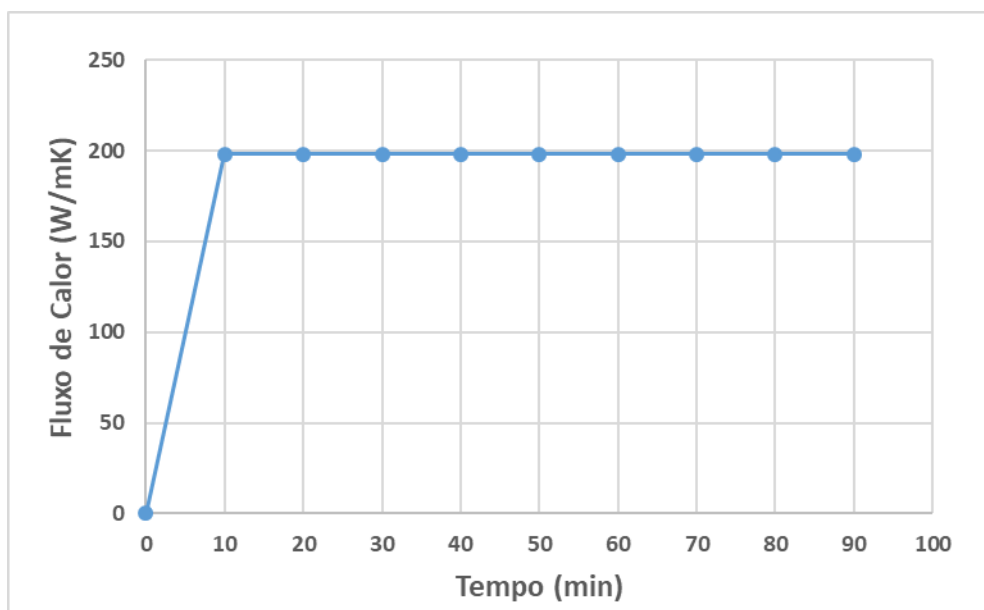
Fonte: Adaptado do ADINA R & D, INC (2019).

3.4. CARREGAMENTO

A simulação foi realizada em uma temperatura de ambiente de 30°C. Tendo o corpo-de-prova sido exposto a uma carga de fluxo de calor aplicada em forma de uma função tempo. Essa função é ilustrada no Gráfico 2, tendo característica de uma rampa cuja inclinação é dada pela taxa de crescimento de 19.8 J/m²min. Após os 10 minutos o valor se estabiliza em 198 W/m² e fica constante até o fim da simulação.

Além da carga de fluxo de calor, o corpo-de-prova está exposto a outras formas de mecanismos de transferência de calor, como Convecção e radiação ambos estando à mesma temperatura do ambiente. Ao contrário da outra carga, estas estariam em uma função constante.

O valor escolhido para o fluxo de calor foi estabelecido com propósito de equivaler com o protótipo de Barros, formado basicamente por uma placa de argamassa, duas lâmpadas incandescente de potência de 250W cada e quadro termopares ligados ao computador, para no fim, possibilitar uma comparação com os dados obtidos pela mesma, com a utilização do protótipo.

Gráfico 2: Função tempo do fluxo de calor.

Fonte: Autoria Própria (2019)

3.5. MODELOS E MATERIAS

Após ter definido a geometria e o carregamento, partiu-se para definição do material que irá diferenciar os corpos-de-prova.

Tabela 2: Propriedades de simulação dos materiais presentes nos modelos.

Propriedades	Modelos				
	M1	M2	M3	M4	M5
Condutividade térmica (W/mK)	1,34	1,08	0,62	0,34	0,24
Capacidade calorífica Volumétrica (MJ/m³K)	2,42	2,18	1,5	1,32	1,23
Coeficiente de Emissividade	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
Coeficiente de convecção (W/m²K)	20	20	20	20	20

Fonte: Autoria própria (2019)

Os valores obtidos de condutividade térmica e capacidade calorífica volumétrica foram obtidos do trabalho de Barros (2018).

Na literatura pesquisada, não foram encontrado valor para o coeficiente de emissividade de argamassa com agregado de vermiculita, porém foi utilizado o coeficiente de emissividade de argamassas comuns. Após o esclarecimento foi adotado uma média ponderada entre argamassa (sem especificações) e argamassa seca. (Valores encontrado no adendo: tabelas de emissividades)

Já o coeficiente de convecção na literatura não possuía nenhum valor específico, apenas Limites, de 10 e 100. Sendo assim, foram adotados valores de 20.

3.6. MALHA E LIMITES DE FRONTEIRA

Nesta etapa segue a definição da malha. Devido às limitações postas pelo o software ADINA, foi priorizado o maior número de elementos por cm de modelo na horizontal, em busca de ter um melhor entendimento sobre o que acontece na placa.

Assim, foi estabelecido um número de 20 divisões no eixo y e de 37 no eixo z. Além da malha, foi determinado a locação dos limites de fronteiras, as quais teriam troca por radiação e convecção. Ficou decidido todas faces exceto uma face, a qual a carga está sendo aplicada. Como fica ilustrado na figura 3.

3.7. SIMULAÇÃO

Após a Construção dos modelos a simulação é executada. O Software gera dados para cada elemento em relação ao tempo de simulação.

Foi definido uma linha modelo na direção horizontal na altura média (14,75 cm) do corpo-de-prova, a qual contém 21 elementos, sendo 20 do corpo e 1 exposto a qual nominarei de “Ambiente”. A tela a seguir demonstra como foi definido a linha modelo.

Figura 6: Definição da linha modelo.

Define Model Line (Sequence of Nodal Points) ✕

Model Line Name:

Node Points

	Node {p}	Substructure	Reuse	Weight
1	780	0	1	1
2	742	0	1	1
3	704	0	1	1
4	666	0	1	1
5	628	0	1	1
6	590	0	1	1
7	552	0	1	1
8	514	0	1	1
9	476	0	1	1
10	438	0	1	1

Defaults

Substructure:
 Reuse:
 Weight:

Fonte: Adaptado do ADINA R & D, INC (2019).

Em seguida foi obtida uma matriz de ordem 21x3 referente a linha modelo a qual tinha sido definida anteriormente, sendo criada uma matriz desta para cada 1 minuto, possuindo, no total, 90. Onde que as 3 colunas representam as variáveis em questão, que são: número do elemento referente à linha modelo, posição (no eixo horizontal) e a temperatura.

Figura 7: Matriz de resultados.

List Model Line Values

Model Line Name: 1

Result Grid:

Result Control: DEFAULT

Smoothing Technique: AVERAGED

Response Option

☐ Single Response ☒ Range of Responses

Response: DEFAULT

Response Range: DEFAULT

Variables to List

☒ 1 Coordinate Y-ORIGINAL

☒ 2 Temperature TEMPERATURE

☐ 3 Coordinate DISTANCE

☐ 4 Temperature TEMPERATURE

☐ 5 Temperature TEMPERATURE

☐ 6 Temperature TEMPERATURE

Apply Export... Close

Time 0.00000E+00

1	0.00000E+00	3.00000E+01
2	1.00000E-03	3.00000E+01
3	2.00000E-03	3.00000E+01
4	3.00000E-03	3.00000E+01
5	4.00000E-03	3.00000E+01
6	5.00000E-03	3.00000E+01
7	6.00000E-03	3.00000E+01
8	7.00000E-03	3.00000E+01
9	8.00000E-03	3.00000E+01
10	9.00000E-03	3.00000E+01
11	1.00000E-02	3.00000E+01
12	1.10000E-02	3.00000E+01
13	1.20000E-02	3.00000E+01
14	1.30000E-02	3.00000E+01
15	1.40000E-02	3.00000E+01
16	1.50000E-02	3.00000E+01
17	1.60000E-02	3.00000E+01
18	1.70000E-02	3.00000E+01
19	1.80000E-02	3.00000E+01
20	1.90000E-02	3.00000E+01

Fonte: Adaptado do ADINA R & D, INC (2019).

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos, através das simulações realizadas. Os dados apresentados serão referentes à temperatura x posição, representados via gráficos, comparando-se com outras simulações com teores de vermiculita em diferentes instantes e com trabalho de Barros sobre análise térmica e mecânica de argamassas com adição de vermiculita.

Vale lembrar que os dados apresentados neste capítulo são referentes à linha modelo, a qual foi definida no tópico 3.7. A origem dos gráficos representa o lado externo do corpo-de-prova.

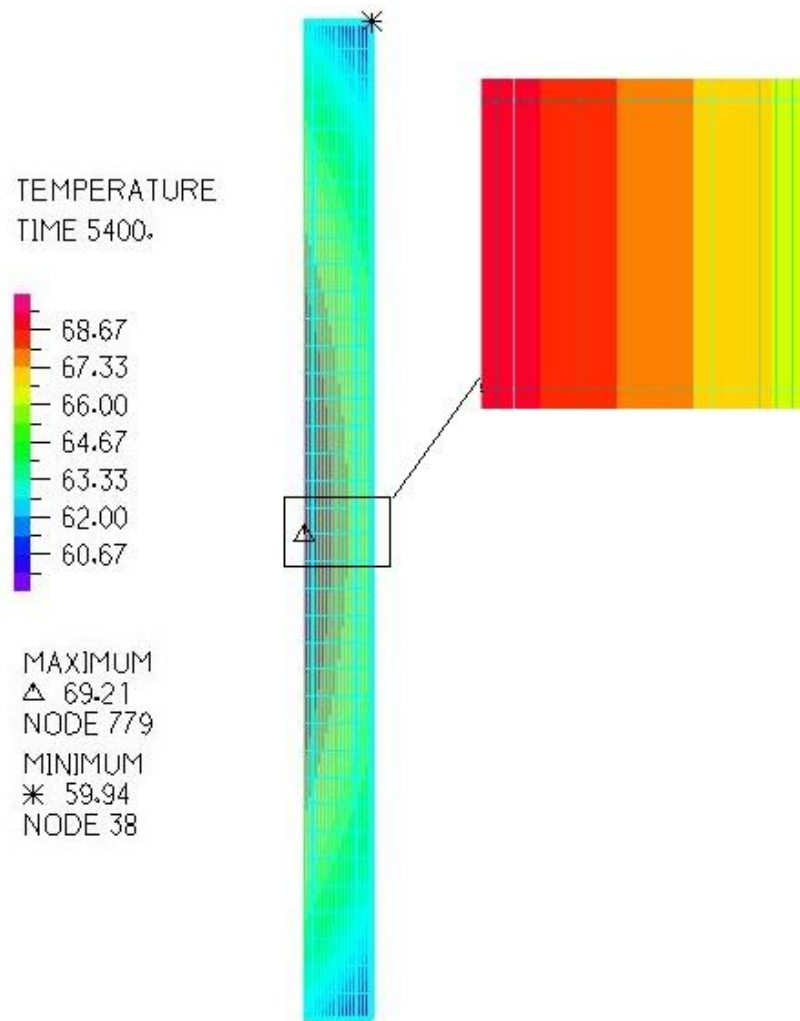
As comparações de variação serão realizadas para o instante final.

4.1. MODELO 1 – 0%

A figura 8 apresenta a distribuição de temperatura ao longo do corpo-de-prova para o instante de 90 minutos ou 5400 segundos, apresentando os valores de máximo e mínimo.

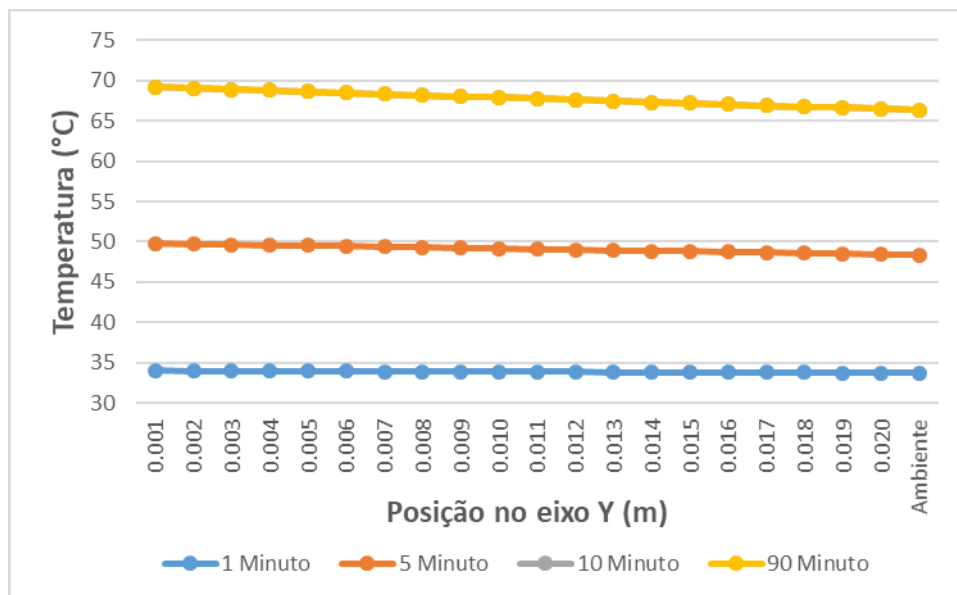
O modelo obteve a menor temperatura na junção das fronteiras, com valor de 59,94°C. Já o máximo, ficou localizado na altura média (linha modelo) do eixo z, possuindo valor de 69,21°C. com uma variação de 9.27 do valor mínimo.

Figura 8: Distribuição de temperatura no corpo-de-prova com 0 % de substituição.



Fonte: Autoria Própria (2019) / Adaptação do ADINA R & D, INC (2019).

Na linha modelo, foi apresentado uma expansão do gráfico de cores e um gráfico a qual relaciona a temperatura em relação a posição no corpo de prova. Para instantes de 1, 5, 10 e 90 minutos, destacando que os valores de 10 a 90 min são os mesmos, devido ao fim da rampa de aquecimento se tornando um valor constante, para esse teor. Os valores tenderam a ficar relativamente constante em todo corpo de prova. Com exceção do tempo de 10 a 90 minutos. A qual já obteve uma variação de 2,86 °C na linha modelo, baixa em relação ao mínimo e máximo. Esse efeito acontece devido as fronteiras que empurram as cargas para o centro, provocando um aumento de temperatura na parte externa (área em contato com a carga).

Gráfico 3: Perfil térmico do modelo 1.

Fonte: Autoria Própria (2019)

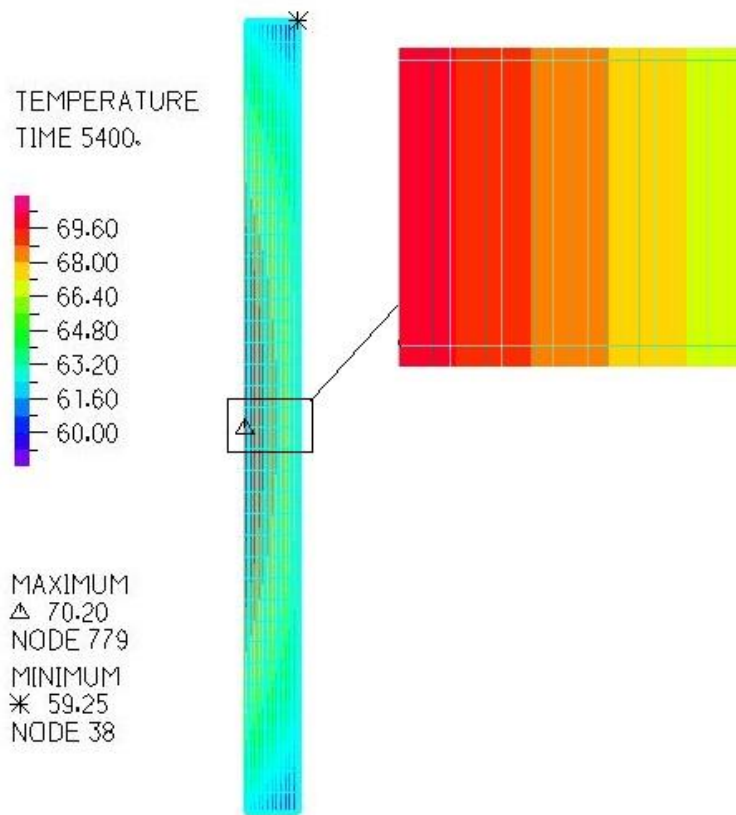
4.2. MODELO 2 – 25%

A figura 9 apresenta a distribuição de temperatura ao longo do corpo-de-prova para o instante de 90 minutos ou 5400 segundos. Expõe os valores de máximo e mínimo.

O modelo obteve a menor temperatura na junção das fronteiras, com valor de 59,25°C. Já o máximo, ficou localizado na altura média (linha modelo) do eixo z igual ao anterior, possuindo valor de 70,20°C. com uma variação de 10,95°C do valor mínimo.

Neste modelo, ao comparar com o M1, já dar para perceber que a temperatura mínima reduziu levemente.

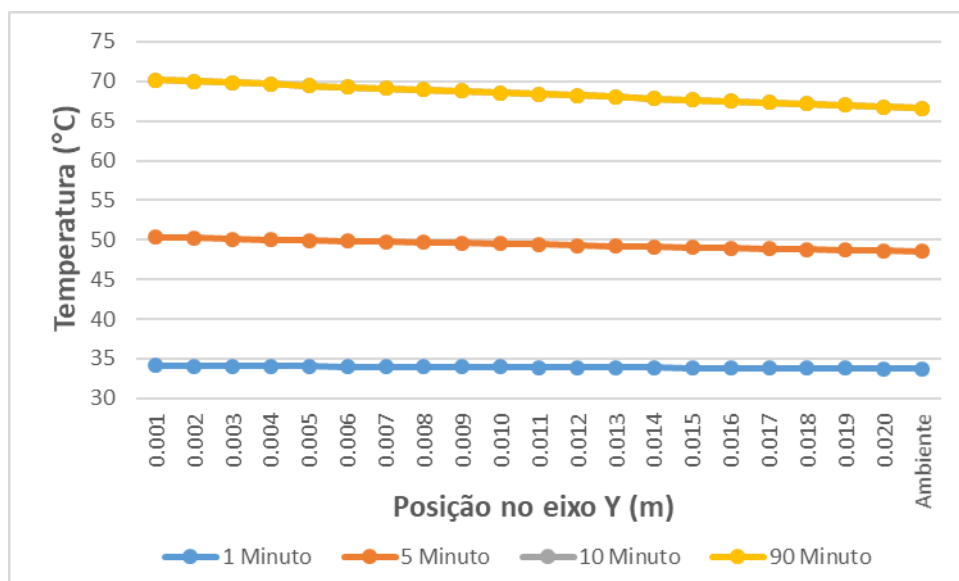
Figura 9: Distribuição de temperatura no corpo-de-prova com 25% de substituição.



Fonte: Autoria Própria (2019) / Adaptação do ADINA R & D, INC (2019).

No segundo modelo a variação na linha modelo foi de 3,6°C. As funções expressas no gráfico 4 começam a dar sinais de encurvamento.

Gráfico 4: Perfil térmico do modelo 2



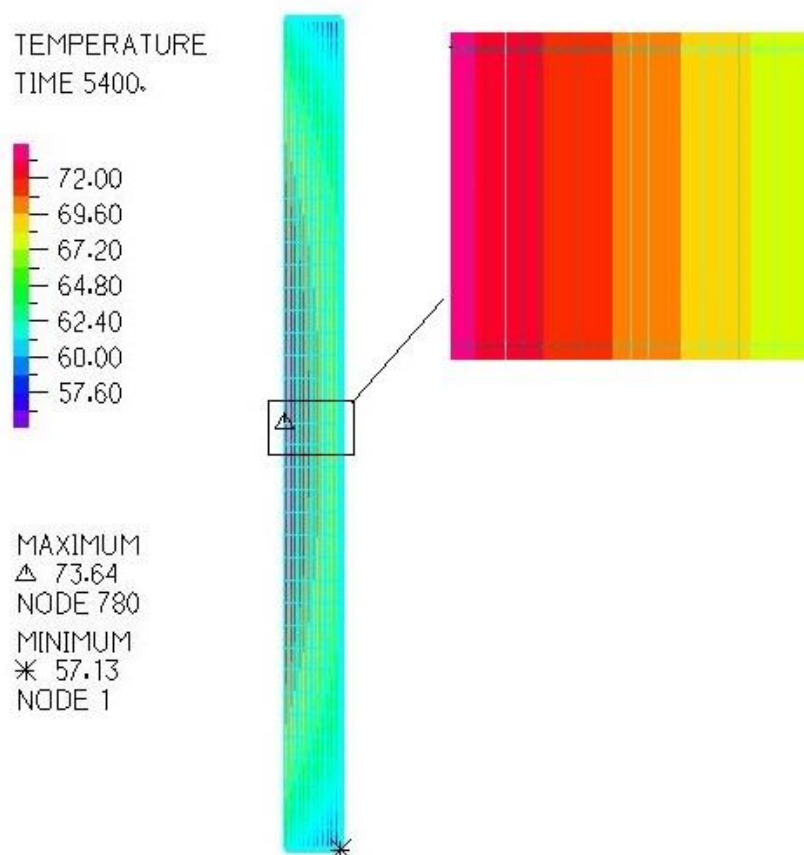
Fonte: Autoria Própria (2019)

4.3. MODELO 3 – 50%

O modelo com teor de 50% obteve resultados de máximo e mínimo localizados nos mesmos pontos que os modelos anteriores. Com a diferença nos valores de máximo e mínimo, que alcançaram respectivamente valores de 73,64 e 57,13°C. Resultando em uma variação de 16,51°C.

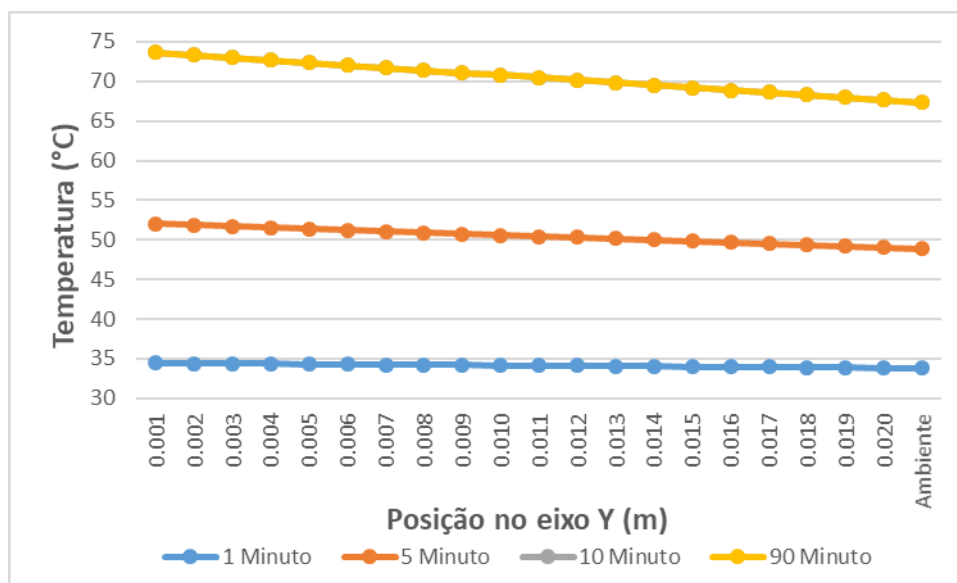
Vale lembrar que essa variação é entre o máximo e o mínimo e não sobre a variação média das temperaturas no decorrer do eixo z.

Figura 10: Distribuição de temperatura no corpo-de-prova com 50 % de substituição.



Fonte: Autoria Própria (2019) / Adaptação do ADINA R & D, INC (2019)

Os valores obtidos na linha modelo foram de mínima de 67,35°C e máxima de 73,63. Resultando em uma variação de 6,28°C.

Gráfico 5: Perfil térmico do modelo 3.

Fonte: Autoria Própria (2019)

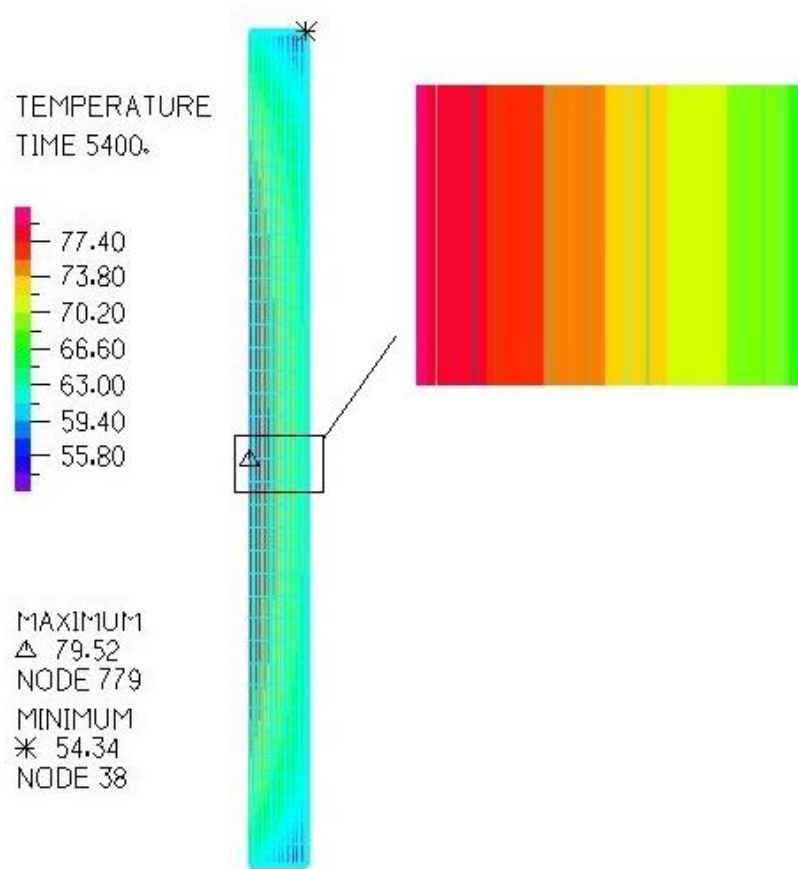
4.4. MODELO 4 – 75%

A figura 12 apresenta a distribuição de temperatura ao longo do corpo-de-prova para o instante de 90 minutos além dos valores de máximo e mínimo.

O modelo 4 obteve valor mínimo de 54,34°C e valor máximo de 79,52°C. tendo uma variação de 25,18°C. Já que é decorrente ao concentramento de cargas térmicas no centro da peça. Se tratando do corpo-de-prova, este valor não tem muito significado. Já que boa parte da área do corpo está em temperaturas bem abaixo.

Porém não deve ser menosprezado, já que pode acarretar em patologias na região localizada.

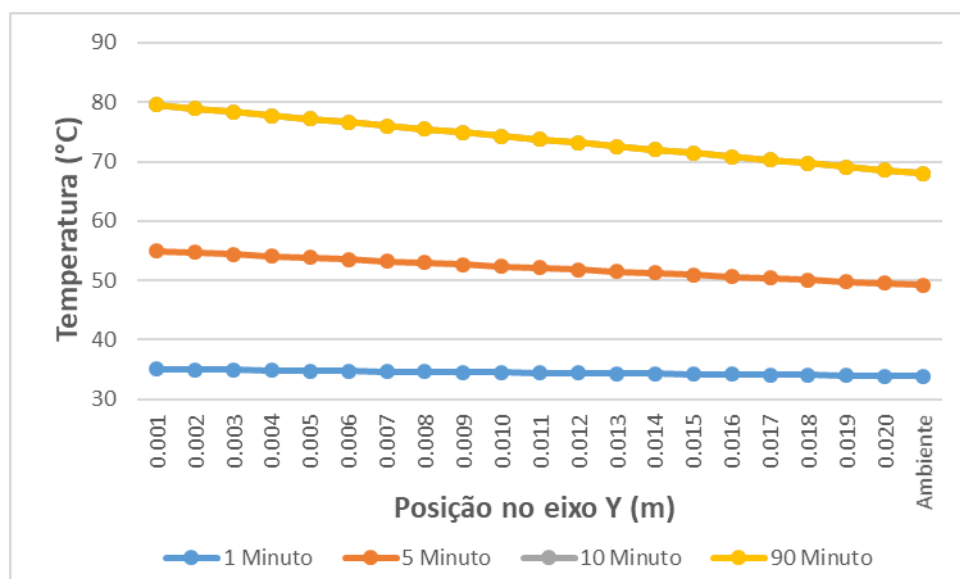
Figura 11: Distribuição de temperatura no corpo-de-prova com 75 % de substituição.



Fonte: Autoria Própria (2019) / Adaptação do ADINA R & D, INC (2019).

Os valores obtidos na linha modelo foram de mínimo de 67,96°C e máximo de 79,52°C. Possuindo uma variação de 11,56°C.

Gráfico 6: Perfil térmico do modelo 4



Fonte: Autoria Própria (2019)

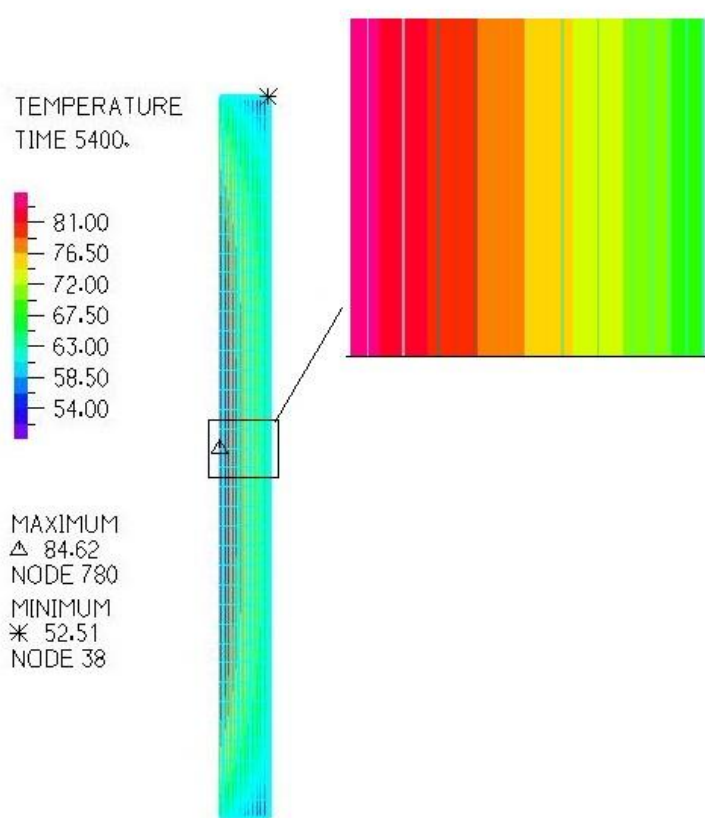
4.5. MODELO 5 – 100%

A figura 12 apresenta a distribuição de temperatura ao longo do corpo-de-prova para o instante de 90 minutos além dos valores de máximo e mínimo.

O modelo 5 obteve valor mínimo de 52,11°C de todos modelos, porem obteve a maior temperatura do trabalho com valor de 84,62°C. tendo uma variação de 32,51°C. Já que é decorrente ao concentramento de cargas térmicas no centro da peça. Se tratando do corpo-de-prova, este valor não tem muito significado como já tinha sido. Já que boa parte da área do corpo está em temperaturas bem abaixo.

Porém como já dito anteriormente, não deve ser menosprezado, já que pode acarretar em patologias na região localizada.

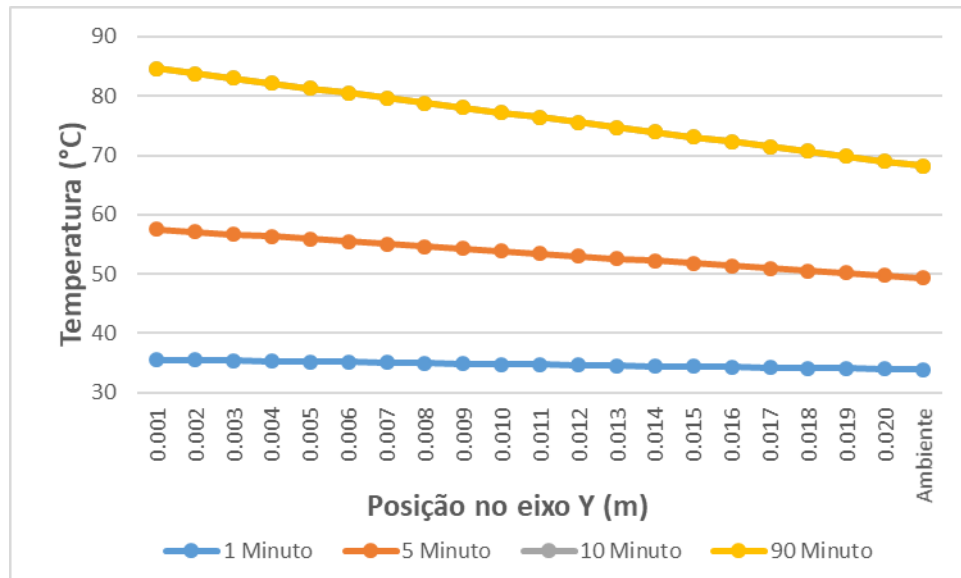
Figura 12: Distribuição de temperatura no corpo-de-prova com 100 % de substituição.



Fonte: Autoria Própria (2019) / Adaptação do ADINA R & D, INC (2019).

Na linha modelo obteve uma variação de 16,42°C, para o instante 90. No gráfico 7 fica nítido a declividade da função após o instante 5.

Gráfico 7: Perfil térmico do modelo 5.



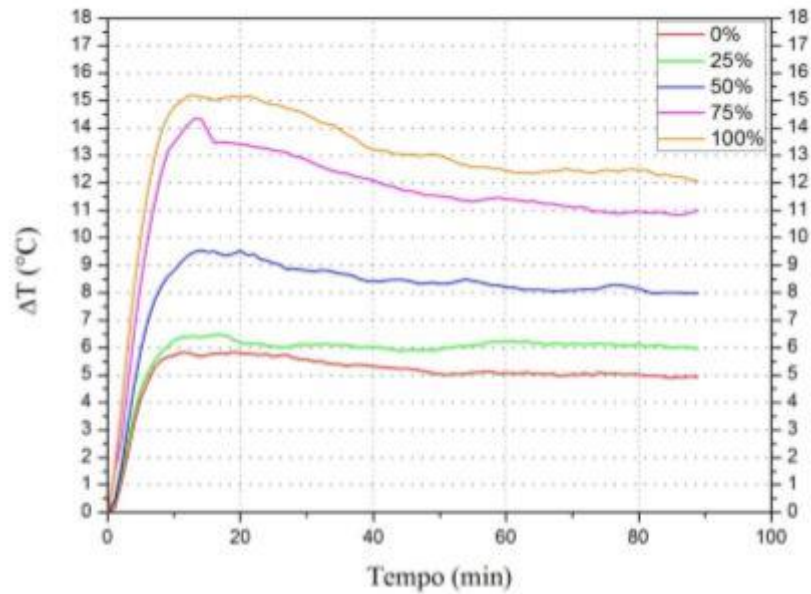
Fonte: Autoria Própria (2019)

4.6. RESULTADOS GERAIS

O gráfico 8 vem com propósito de juntar todos os dados para um instante de 90 minutos e realizar uma comparação com os dados de Barros.

Os resultados de barras obtidos em ensaios foram 6; 6,5; 9,5; 14,5 e 15,2 °C. Para teores de 0,25,50,75 e 100% respectivamente.

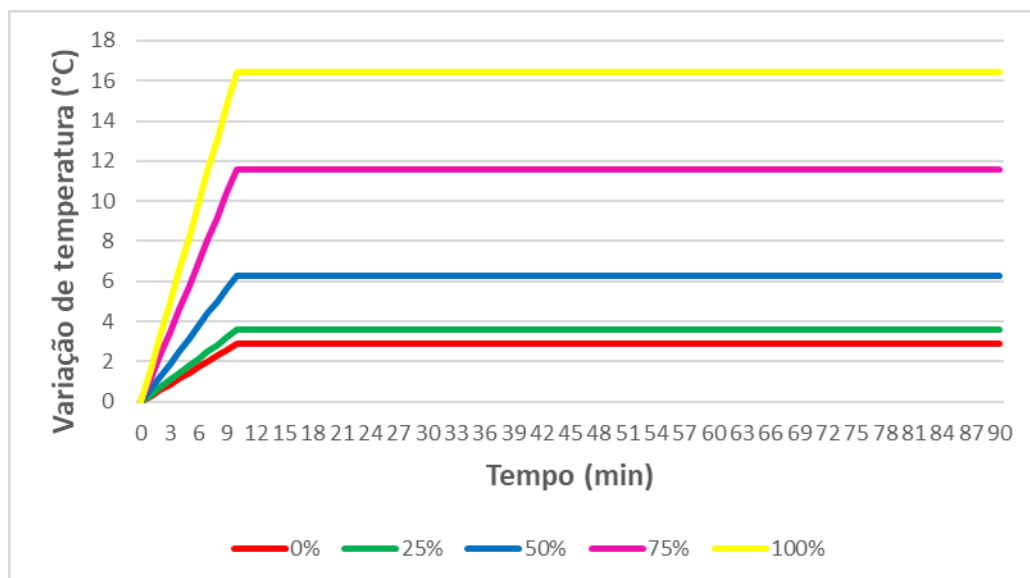
Figura 13: Variação de temperatura versus tempo obtido por Barros.



Fonte: Barros (2018)

Os resultados encontrados nesta simulação, que buscou uma padronização, por motivos de comparação. Utilizando uma linha modelo obteve valores de 2,86; 3,6; 6,28; 11,55; 16,42 $^{\circ}\text{C}$. para Os mesmos teores citados anteriormente 0, 25, 50, 75 e 100%.

Gráfico 8: Variação de temperatura em relação ao tempo.



Fonte: Autoria Própria (2019).

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram analisados 5 modelos de argamassa com diferentes níveis de substituição do agregado miúdo por vermiculita, visando um melhor conforto térmico para residência e prédios comerciais.

Com intenção de apenas apresentar os valores, já que para fazer afirmação que tal argamassa com teor $x\%$ de vermiculita era melhor, deveria ser feita uma análise, buscando entender a finalidade e as consequências que aquela argamassa traria (patologias, dificuldades construtivas e etc).

Os valores obtidos foram condizentes com as características do material avaliado. Porém nos gráficos de temperatura de cor, ficou explícito que quanto mais aumentava o teor de vermiculita, criava um efeito funil, a qual as cargas distribuídas tendiam a se concentrar no centro, criando altas temperaturas na parte externa da linha modelo. Devendo ser considerados, podendo gerar fissuras, deslocamento do revestimento e aquecimento inesperado dos fios elétricos as quais passe naquela região).

Porém este efeito não prejudicou a linha modelo integralmente, que obteve valores no elemento ambiente menores do que seus antecessores, em contrapartida a variação de temperatura não obteve os valores esperados.

Esquecendo um pouco os problemas com o efeito funil, ficou nítido que a utilização de argamassa com vermiculita, é eficaz e recomendada, já que realizou uma redução da temperatura na parte interna de até $16,42^{\circ}\text{C}$ na linha modelo, nas outras linhas só tende a ser menores. Após essas considerações, ficou claro que a utilização da argamassa com vermiculita, gerará uma redução energética dentro da residência e um melhor conforto térmico para seus moradores ou frequentadores.

Os valores ao comparado com os de Barros, demonstrou que a simulação com a utilização de linha modelo na altura média, se provou ineficiente para teores abaixo de 50% e se equivalendo para teores maiores que 50%, Devido ao efeito de concentração de cargas.

Ao final podemos afirmar que a simulação teve sucesso, porém a metodologia escolhida para coleta de dados não foi satisfatória, colhendo valores que não retrata a realidade do corpo-de-prova para teores baixos.

Após o trabalho ficou visível aberturas para novos trabalhos, como definição dos valores de Coeficiente de emissividade das argamassas com agregado de vermiculita.

Simulação em um sistema real de vedação. Onde contenha Argamassa, Tijolos e Revestimento.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 15220**: Desempenho Térmico de edificações. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

_____. **NBR 15575**: Edificações habitacionais – desempenho. Rio de Janeiro: ABNT, 2013

ASHRAE - American Society of heating, refrigerating and air-conditioning engineers. Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy. Atlanta; 2013.

BARROS, Ilana Maria da Silva. **Análise térmica e mecânica da argamassa de revestimento com adição de vermiculita expandida em substituição ao agregado**. 2018. 77 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

BARROSA, Marcelo Rosário da. **Princípios Fundamentais da transferência de calor**. 2004. 48 f. TCC (Graduação) - Curso de Dept. de Engenharia Naval e Oceânica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004.

BRASIL. EPE. **Nota técnica EPE 030/2018**. Uso de Ar Condicionado no Setor Residencial Brasileiro: Perspectivas e contribuições para o avanço em eficiência energética. Disponível em:< http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-341/NT%20EPE%20030_2018_18Dez2018.pdf>. Acesso em: 30 julho. 2019.

CALLISTER JR, William D. **Ciência e Engenharia de materiais uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: Ltc Editoria, 2002. 588 p.

CARDOZO, Marcus. **O avanço tecnológico dos materiais na Construção Civil**. Dom total [S.I.] 2018. Disponível em:< <https://domtotal.com/noticia/1270734/2018/06/o-avanco-tecnologico-dos-materiais-na-construcao-civil/>>. Acesso em: 20 maio. 2019.

CINTRA, Cynthia Leonis Dias. **Argamassa para revestimento com propriedades termoacústicas, produzida a partir de vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus**. 2013. 154 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia de Materias, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013.

CONTEMP., s.d. Adendo: Tabelas de Emissividade.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J.. **Transferência de Calor e Massa: Uma abordagem prática**. 4. ed. Porto Alegre: Amgh Editora Ltda, 2011.

FRANÇA, S. C. A., LUZ, A.B. **Utilização da vermiculita como adsorvente de de compostos orgânicos poluentes da indústria do petróleo**. XIX Encontro Nacional de Tratamento de Minério e Metalurgia Extrativa, Recife/PE, 2002.

FREITAS, Eduardo de. "Clima brasileiro"; *Brasil Escola*. Disponível em <<https://brasilecola.uol.com.br/brasil/clima-brasileiro.htm>>. Acesso em 20 de maio de 2019.

KLYUSOV, A. A, FATTAKHOV, Z.M., KLYUSOV, V. A. **Compressible cement compositions improve isolation**. Gulf, World oil A., 2005.

KREITH, Frank; BOHN, Mark S. **Princípios de transferência de calor**. São Paulo: Edgard Blücher, 2003. All Tasks.

RASHAD, A. M. **Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer**. Construction and Building Materials, 2016.

RUAS, Álvaro César. Conforto térmico nos ambientes de trabalho. 1. Ed. São Paulo: Fundacentro, 1999.

