



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DE COMPORTAMENTO TÉRMICO DE COMPÓSITO À BASE DE GESSO E VERMICULITA

Clara Caroline de Araújo Azevedo

Natal/RN

Janeiro, 2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE

CENTRO DE TECNOLOGIA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DE COMPORTAMENTO TÉRMICO DE COMPÓSITO À BASE DE GESSO E VERMICULITA

Clara Caroline de Araújo Azevedo

Orientador: Prof. George Santos Marinho

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica, na área de termociências.

Natal/RN

Janeiro, 2017

Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN
Sistema de Bibliotecas - SISBI
Catalogação de Publicação na Fonte. UFRN - Biblioteca Central Zila Mamede

Azevedo, Clara Caroline de Araújo.

Estudo de comportamento térmico e compósito à base de gesso e vermiculita / Clara Caroline de Araújo Azevedo. - 2017.
56 f.: il.

Mestrado (Dissertação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Pós Graduação em Engenharia Mecânica. Natal, RN, 2017.

Orientador: Prof. Dr. George Santos Marinho.

1. Conservação de energia - Dissertação. 2. Transferência de calor - Dissertação. 3. Propriedades térmicas - Dissertação. I. Marinho, George Santos. II. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 502.171:531.62

CLARA CAROLINE DE ARAÚJO AZEVEDO

ESTUDO DE COMPORTAMENTO TÉRMICO DE COMPÓSITO À BASE DE GESSO E VERMICULITA

Dissertação julgada e _____ em ____ de Janeiro de 2017, como requisito necessário para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

BANCA EXAMINADORA

Orientador - Prof. Dr. George Santos Marinho
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Examinador Interno - Profº. Dr. Aldomar Pedrini
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Examinador Externo - Profº. Dr. Roberto Silva De Souza
Instituto Federal do Rio Grande do Norte

Dedico este trabalho a minha
família, pelo apoio e participação
na construção de tudo que sou.

AGRADECIMENTOS

À Deus, pois é a luz e razão da minha vida.

A minha família, por tudo que eles me representam.

À CAPES, pelo financiamento da pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica/UFRN pelo apoio à pesquisa.

Ao Laboratório de Transferência de Calor – NTI / UFRN.

Ao Dr. Francisco Raimundo da Silva / LAVAT – INPE – CRN.

Ao Profº. Dr. George Santos Marinho.

Ao Profº. Dr. Aldomar Pedrini.

Ao Profº. Dr. Roberto Silva De Souza.

AZEVEDO, C. C. de A. Estudo de compósito à base de gesso e vermiculita para isolamento térmica. 2017. 56p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

RESUMO

Foi desenvolvido um compósito a base de gesso e vermiculita destinado ao uso como material de isolamento térmica em elementos construtivos. Na composição da mistura, considerou-se a adição de vermiculita em substituição ao gesso nas seguintes proporções: 0 % (“padrão”), 5 %, 10 %, 15 % e 20 %. Duas razões de água / gesso (A/G) foram consideradas na produção das misturas: 0,45 e 0,8. Foram fabricados corpos de prova cilíndricos para determinação das propriedades térmicas das misturas. Foram medidos os seguintes parâmetros: condutividade, resistividade, difusividade e capacidade calorífica volumétrica. Para estudo do desempenho térmico, foram produzidos corpos de prova com formato de placa plana. Cada placa foi fixada na parte superior de uma câmara de testes termicamente isolada. Termopares foram instalados nas faces das placas, no interior e na base da câmara. Em seguida, foram conectados a um sistema de aquisição de dados ligado a um computador. As câmaras, com cada composição de mistura, foram montadas sob uma fonte de radiação térmica artificial situada no interior de uma sala climatizada. A partir dos resultados dos ensaios, foram construídos gráficos para comparação dos parâmetros térmicos e de desempenho térmico de cada composição. Com base nos resultados dos ensaios, determinou-se que, em relação ao gesso comum, o compósito desenvolvido apresentou: menor massa específica, redução da condutividade térmica e aumento da resistividade térmica em função do aumento do teor de vermiculita adicionado à mistura e maior capacidade de isolamento térmica. A combinação dessas características tornam o compósito desenvolvido passível de uso como material para produção de elementos construtivos que proporcionem redução da carga térmica no interior das edificações devido à radiação solar incidentes nos fechamentos opacos e, conseqüentemente, melhor conservação de energia.

Palavras-chave: Conservação de energia; Transferência de calor; Propriedades térmicas.

AZEVEDO, C. C. de A. Composite study with gypsum and vermiculite for thermal insulation. 2017. 56p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Programa de Pós-graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

ABSTRACT

A composite based on gypsum and vermiculite was developed to be used as thermal insulation material in building elements. In the composition of the mixture, the addition of vermiculite in substitution of gypsum in the following proportions was considered: 0% ("standard"), 5%, 10%, 15% and 20%. Two water / gypsum (A / G) ratios were considered in the production of the mixtures: 0.45 and 0.80. Cylindrical test proof body were fabricated to determine the thermal properties of the mixtures. The thermal properties were determined using the KD - 2 Pro meter manufactured by Decagon Devices Inc. The following parameters were measured: conductivity, resistivity, diffusivity and volumetric heat capacity. To study the thermal performance, flat bodies were produced with flat plate format. Each plate was attached to the top of a thermally insulated test chamber. Thermocouples were installed on the faces of the plates, inside and at the base of the chamber. They were then connected to a data acquisition system connected to a computer. The chambers, with each mixing composition, were mounted under a source of artificial thermal radiation located inside a heated room. From the results of the tests, graphs were constructed to compare the thermal parameters and thermal performance of each composition. Based on the results of the tests, it was determined that, in relation to the common gypsum, the composite developed showed: lower specific mass, reduction of thermal conductivity and increase of thermal resistivity as a function of the increase of vermiculite content added to the mixture and greater capacity Thermal insulation. The combination of these characteristics makes the composite developed usable as a material for the production of constructive elements that provide reduction of the thermal load inside the buildings due to the solar radiation incident on the opaque closures and, consequently, better conservation of energy.

Keywords: Energy conservation; Heat transfer; Thermal properties.

LISTA DE SÍMBOLOS

κ	Condutividade térmica [W/m.°C]
Q_k	Taxa de transferência de calor [W/m ²]
A	Área da superfície transversal ao fluxo de calor [m ²]
$\frac{dT}{dx}$	Gradiente de temperatura [°C/m]
r	Resistividade térmica [°C·cm/W]
L	Espessura do material [m]
ΔT	Diferença entre a temperatura da face quente e a face fria da placa [°C]
R	Resistência térmica [°C/W]
C	Capacidade calorífica volumétrica [J/(m ³ ·°C)]
c_p	Calor específico [J/(Kg·K)]
ρ	Massa específica [kg/m ³]
m	Massa [kg]
V	Volume [m ³]
α	Difusividade térmica [mm ² /s]
A/G	Razão água e gesso

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Processo de beneficiamento a seco, mais utilizado no Brasil.....	15
Figura 2.2: Amostras de vermiculita: (a) natural e (b) expandida.....	16
Figura 3.1: O gesso utilizado no trabalho: (a) embalado; (b) pronto para ser adicionado à vermiculita.....	24
Figura 3.2: A vermiculita expandida utilizada no trabalho: (a) embalada; (b) pronto para ser adicionado ao gesso.....	25
Figura 3.3: (a) molde; (b) corpos de prova cilíndricos prontos para ensaios de propriedades térmicas.....	27
Figura 3.4: (a) placa de compósito no interior de molde; (b) corpo de prova pronto para ensaios de desempenho térmico.....	28
Figura 3.5: Sonda SH-1 do medidor de propriedades térmicas KD2 Pro.....	29
Figura 3.6: Bancada com KD2-Pro e câmara térmica.....	30
Figura 3.7: Câmara de testes.....	31
Figura 3.8: Disposição dos termopares na placa e no interior da câmara.....	31
Figura 3.9: Fonte de radiação térmica artificial.....	32
Figura 3.10: Ensaio de desempenho térmico em fase de aquecimento.....	33
Gráfico 3.1: Curvas de temperaturas médias dos compósitos de mistura M5.....	34
Gráfico 3.2: Regime permanente na fase de aquecimento da mistura M5.....	34
Gráfico 3.3: Fase de resfriamento da placa M5.....	35
Gráfico 4.1: Variação da massa específica das misturas com $A/G=0,45$	36
Gráfico 4.2: Variação da massa específica das misturas com $A/G=0,80$	37
Gráfico 4.3: Condutividade térmica das misturas com $A/G=0,45$	38
Gráfico 4.4: Condutividade térmica das misturas com $A/G=0,8$	38
Gráfico 4.5: Resistividade térmica das misturas com $A/G=0,45$	39
Gráfico 4.6: Resistividade térmica média das misturas com $A/G=0,80$	39
Gráfico 4.7: Capacidade calorífica das misturas com $A/G=0,45$	40
Gráfico 4.8: Capacidade calorífica das misturas com $A/G=0,80$	41
Gráfico 4.9: Difusividade térmica das misturas com $A/G=0,80$	42
Gráfico 4.10: Difusividade térmica das misturas com $A/G=0,80$	42
Gráfico 4.11: Ensaio de desempenho térmico da mistura M4.....	43
Gráfico 4.12: Regime permanente da mistura M4.....	44
Gráfico 4.13: Regime permanente da mistura M5.....	44
Gráfico 4.14: Fase de resfriamento da placa M7.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1: Características físicas, químicas e mecânicas do gesso em pó.....	11
Tabela 2.2: Propriedades térmicas do gesso (emboço)	11
Tabela 2.3: Materiais usados no estudo de compósitos à base de gesso	13
Tabela 2.4: Especificação da granulometria da vermiculita expandida	15
Tabela 2.5: Propriedades térmicas da vermiculita em flocos	16
Tabela 2.6: Materiais aplicados à construção civil.....	19
Tabela 2.7: Efeito da difusividade térmica na taxa de propagação de calor	22
Tabela 2.8: Massa específica de alguns materiais	22
Tabela 3.1: Combinações de materiais utilizadas na produção do compósito	26
Tabela 4.1: ΔT entre pontos no regime permanente para $A/G=0,45$	45
Tabela 4.2: ΔT entre pontos no regime permanente para $A/G=0,80$	45
Tabela 4.3: Efeito da difusividade térmica na taxa de propagação de calor nos compósitos com $A/G=0,45$	46
Tabela 4.4: Efeito da difusividade térmica na taxa de propagação de calor nos compósitos com $A/G=0,80$	46

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	8
1.1.	Hipótese	8
1.2.	Objetivo geral	9
1.3.	Objetivos específicos	9
1.4.	Contribuições	9
2.	FUNDAMENTAÇÃO	10
2.1.	Gesso	10
2.1.1.	Revestimento de Gesso	12
2.1.2.	Compositos à base de gesso	12
2.2.	Vermiculita	14
2.3.	Comportamento térmico dos materiais	17
2.3.1.	Condutividade térmica	18
2.3.2.	Resistividade térmica	20
2.4.3.	Capacidade calorífica	21
2.4.4.	Difusividade térmica	21
2.4.5.	Massa específica	22
3.	MATERIAL E PROCEDIMENTOS	23
3.1.	Material	23
3.1.1.	Gesso	23
3.1.2.	Água	24
3.1.3.	Vermiculita expandida	24
3.2.	Procedimentos	25
3.3.	Técnicas de Caracterização	28
3.3.1.	Ensaio para determinação de propriedades térmicas	28
3.3.2.	Ensaio para determinação de desempenho térmico	30
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	36

4.1.	Propriedades térmicas	36
4.1.1.	Massa específica	36
4.1.2.	Condutividade térmica	37
4.1.3.	Resistividade térmica	39
4.1.4.	Capacidade calorífica volumétrica.....	40
4.1.5.	Difusividade térmica	41
5.	CONCLUSÕES	47
6.	BIBLIOGRAFIA	49

1. INTRODUÇÃO

Conforme dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2016), entre 1995 e 2014 o consumo de energia elétrica no Brasil aumentou em 95%. Segundo análise da ABRAVA (2016), os sistemas prediais consomem aproximadamente 50% de energia elétrica utilizada no país, onde parte significativa desse percentual provém de sistemas dedicados à obtenção de conforto térmico.

Para tentar reduzir o desperdício de energia, os consumidores são alertados para vantagens de adoção de medidas de eficiência energética. Essa medidas vão desde a escolha dos materiais utilizados em edificações até mudanças nos hábitos de uso final da eletricidade. Em alguns casos, a economia pode chegar a cerca de 30% do consumo de energia elétrica em edificações já construídas e de até 50% em novas edificações (GODINI, 2015).

De acordo com Azevedo, Santos e Marinho (2016), a redução da carga térmica no interior das edificações – a maior parte dela oriunda do meio externo, pode ser obtida mediante a aplicação de isolantes térmicos, como revestimentos opacos de superfícies envoltórias com baixa condutividade térmica.

Parte dos problemas entre oferta e demanda de energia pode ser mitigada pela adoção de medidas de conservação, ou seja, redução de perdas por meio de projetos que considerem ações de eficiência energética. Neste sentido, buscou-se desenvolver um novo material que proporcionasse maior isolamento térmica, rapidez de produção, custo acessível e, principalmente, facilidades de inserção na construção civil.

1.1. Hipótese

Em regiões de baixas latitudes, onde se encontram altas temperaturas e índices de umidade, as edificações são grandes consumidoras de energia, decorrente dos sistemas mecânicos de ventilação e climatização utilizados para resfriamento e/ou desumidificação. Pode-se recorrer à isolamento térmica das superfícies divisórias entre os meios exterior e interior das edificações para reduzir o consumo de eletricidade necessário à obtenção de conforto térmico.

O gesso já é utilizado como revestimento de paredes e tetos em ambientes internos e secos. Por meio da adição de vermiculita, é possível obter um novo material compósito que agregue, em um mesmo elemento construtivo, as características do gesso e de material isolante térmico.

1.2. Objetivo geral

Aproveitar o gesso e a vermiculita, que são materiais existentes na região Nordeste do Brasil, para produzir um novo compósito com resistividade térmica superior ao gesso e de fácil inserção na construção civil.

1.3. Objetivos específicos

- Estabelecer o limite de adição de vermiculita expandida na mistura com gesso em função dos limites inferior e superior de água (razão água / gesso) recomendados pelo fabricante.
- Analisar a variação das propriedades térmicas devido à adição de vermiculita em substituição ao gesso;
- Analisar a variação das propriedades térmicas do compósito em função da razão A/G.

1.4. Contribuições

Os resultados desta pesquisa podem contribuir: (a) no âmbito científico, para estimular pesquisas sobre propriedades térmicas de combinações de materiais não convencionais passíveis de uso na construção civil; (b) no âmbito da engenharia, disponibilizar um novo material que proporcione economia de energia na climatização de ambientes.

2. FUNDAMENTAÇÃO

Neste capítulo, foram abordados os aspectos dos materiais utilizados na pesquisa, com ênfase em suas propriedades térmicas.

2.1. Gesso

O gesso é um dos mais antigos materiais de construção fabricados pelo homem. É obtido a partir da extração do mineral gipsita ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), que passa pelos processos de cominuição, calcinação, pulverização e embalagem. Quando misturado à água, o sulfato de cálcio semi-hidratado ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) adquire rigidez e dureza, sendo comercialmente denominado de gesso.

Em função de sua utilização, o gesso é classificado em dois tipos: “Alfa”, utilizado para fins odontológico, ortopédico ou cerâmico; e “Beta”, utilizado na construção civil. O gesso “Beta” pode ser empregado na fabricação de elementos pré-moldados (fundição), argamassas para assentamento, revestimentos manuais e projetados (LEITÃO, 2005).

A falta de mão-de-obra especializada no uso do gesso e o baixo custo do produto resultam em elevado percentual de desperdício. O resíduo assim gerado pode ser aplicado em diferentes setores, conforme sugeriu Marvin (2000) apud Trovão (2012): fabricação de gesso acartonado, correção de acidez do solo, aditivo para compostagem, forração para animais, redução da impermeabilidade de solos compactados, produção de cimento, redução de odores, tratamento de águas turvas (acelerando a precipitação de partículas de argila em suspensão) e absorção de óleo.

Na forma comercial, o gesso possui características adequadas à produção de revestimentos, como: endurecimento rápido, boa aderência aos substratos, propriedades térmicas e acústicas específicas, resistência ao fogo, ausência de retração por secagem e excelente acabamento superficial, conforme especificado

nas Tabelas 2.1 e 2.2, além de propriedades mecânicas compatíveis com os esforços atuantes (SOUZA, 2012).

Tabela 2.1: Características físicas, químicas e mecânicas do gesso em pó

Características	Valores	Limite – NBR 13207 (ABNT, 1994)
Químicas		
Óxido de cálcio (CaO) (%)	43,26	> 38
Anidrido sulfúrico (SO ₃) (%)	54,96	> 53
Óxido de magnésio (MgO) (%)	0,09	
Físicas e mecânicas		
Módulo de finura	0,08	< 1,10
Massa unitária (g cm ⁻³)	0,62	< 0,70
Massa específica real (g cm ⁻³)	2,60	
Área específica (cm ² g ⁻¹)	7643,00	
Consistência normal (a g ⁻¹)	0,60	
Tempo de início de pega (min)	18,95	> 10
Tempo de fim de pega (min)	34,30	> 45
Resistência à compressão (MPa)	9,00	> 8,4
Resistência à tração na flexão (MPa)	3,90	> 3,0

Fonte: Oliveira (2012)

Tabela 2.2: Propriedades térmicas do gesso (emboço)

Propriedade	Unidade	Valor
massa específica, ρ	kg/m ³	1440
condutividade térmica, κ	W/m °C	0,48
capacidade calorífica, c_p	kJ/kg °C	0,84
difusividade térmica, α	mm ² /s	0,4

Fonte: Ozisik (1990)

Segundo Leitão (2005), para preparação da pasta de gesso, deve-se usar um recipiente limpo e água potável, na qual o gesso deve ser adicionado lentamente e de forma uniforme sobre a superfície da água, deixando o pó embeber-se até o molhamento total. Depois, para que a reação de formação do gesso tenha início, os componentes devem ser misturados até que se obtenha uma pasta homogênea.

Trovão (2012) afirmou que quanto maior a relação A/G, maiores o tempo de pega e a porosidade do produto final. Ressaltou que a hidratação completa do gesso

requer uma razão A / G (relação entre a água e o gesso) de 0,186. Concluiu que, para se obter uma massa trabalhável, deve-se utilizar razões A / G entre 0,6 e 1,0.

2.1.1. Revestimento de Gesso

O revestimento é uma camada de material aplicado a uma superfície, interna ou externa, que pode ser fabricada a partir de uma mistura. Como citou Souza (2012), a mistura pode ser composta de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água ou aditivos (aceleradores ou retardadores da pega), desde que esses possuam propriedades de aderência e endurecimento. O revestimento é aplicado na forma de fluido, uma vez que seu comportamento no estado fresco oferece possibilidade de aplicação rápida, eficiente e isenta de defeitos.

O revestimento de gesso apresenta elevada aderência em diversos tipos de substratos, como por exemplo: cerâmicas, concretos, sílico-calcários, argamassas de cimento, madeiras e outros (TROVÃO, 2012).

Trovão (2012) destaca as seguintes desvantagens do gesso como material de construção: suscetibilidade ao desenvolvimento de bolor (que causa deterioração progressiva do revestimento), indução à corrosão (quando aplicado sobre componentes de aço-carbono comum), baixa resistência à deformação (resultando em deslocamento e fissuração do revestimento).

2.1.2. Compósitos à base de gesso

Na Tabela 2.3, apresentam-se alguns materiais utilizados na produção de compósitos tendo o gesso como matriz.

Tabela 2.3: Materiais usados no estudo de compósitos à base de gesso

Materiais fibrosos	<ul style="list-style-type: none"> • vidro • sisal • celulose • algodão
Materiais particulados	<ul style="list-style-type: none"> • madeira • cortiça • vermiculita • resíduos industriais

Fonte: Oliveira (2010)

Macieira (2011) investigou a produção de compósito de gesso com polímero para aplicação na fabricação de painéis externos para edificações. Constatou que a adição de estireno resultou na obtenção de um material hidrófobo, com propriedades superiores às propriedades do gesso puro.

Oliveira (2012) avaliou as propriedades físico-mecânicas de compósitos de gesso com resíduos de EVA (etileno vinil acetato) e com vermiculita, visando aplicação em elementos de revestimento para proteção térmica de alvenarias. Determinou os teores de vermiculita (20 %) e de EVA (12,5 %) mais adequados à confecção dos elementos.

Gencel et al. (2014) estudaram a adição de vermiculita expandida e polipropileno de baixa condutividade térmica ao gesso leve. Fizeram uso de um modelo de elementos finitos não-lineares e de um programa para avaliar e otimizar as concentrações de aditivos e, desse modo, tentar compreender os efeitos proporcionados pelos aditivos sobre a resistência mecânica dos compósitos. Verificaram que as propriedades físicas e mecânicas sofreram alterações: redução da condutividade térmica em função do aumento do teor de vermiculita; redução da resistência à compressão com o aumento do percentual de vermiculita; e aumento da resistência à compressão com o aumento do percentual de fibras de polipropileno.

Borreguero et al. (2014) estudaram um novo material para termorregulação, incorporando parafina comercial ao gesso para desenvolver materiais para construção. Compararam as principais propriedades físicas, térmicas e mecânicas do compósito às propriedades de outros três tipos de termorreguladores. Constataram que o compósito apresentou menor aglomeração e melhor distribuição nos poros do gesso, conferindo ao novo material elevada capacidade de armazenamento de energia térmica. Apesar da adição da parafina reduzir os valores das propriedades mecânicas, os resultados se encontraram dentro dos limites de resistências mínimas de compressão (2,0 MPa) e de flexão (1,0 MPa) de compósitos de gesso para construção civil.

Cunha et al. (2014) desenvolveram um compósito de matriz de gesso e fibra vegetal (*Cocos nucifera*) destinado à fabricação de placas para forração de coberturas e painéis de vedação. Com base nos resultados das análises, evidenciaram as vantagens do novo material: menor condutividade térmica em relação ao padrão, redução do peso dos elementos construtivos e valorização de matéria prima abundante na região.

2.2. Vermiculita

O termo *vermiculita* é usado para referenciar comercialmente um grupo de minerais micáceos de dezenove variedades de silicatos hidratados de magnésio e alumínio, com ferro e outros elementos, $[(Mg, Fe)_3 [(Si, Al)_4 O_{10}] (OH)_2 4H_2O]$. A ocorrência do minério é verificada em todos os continentes da Terra. Contudo, a produção está concentrada em poucos países (África do Sul, Estados Unidos, China, Egito, Austrália, Brasil, Zimbábue e Uganda). O Brasil é o quinto produtor mundial e detém 10% das reservas declaradas, respondendo por 15% da produção. Há no país três pólos de produção, localizados nos estados de Goiás, Paraíba e Bahia (SZNELWAR e SCALABRIN, 2009).

Segundo Oliveira (2010), os processos de mineração e beneficiamento da vermiculita no Brasil começam pela lavra a céu aberto com desmonte mecânico (ver Fig. 2.1). O minério lavrado é exposto ao sol para secagem. Ao atingir um teor de

umidade de cerca de 4 %, iniciam-se as etapas seguintes: moagem em moinhos de martelo e peneiramento para obtenção de concentrados com diferentes frações granulométricas – classificadas em: super-fina, fina, média e grossa (ver Tab. 2.4).

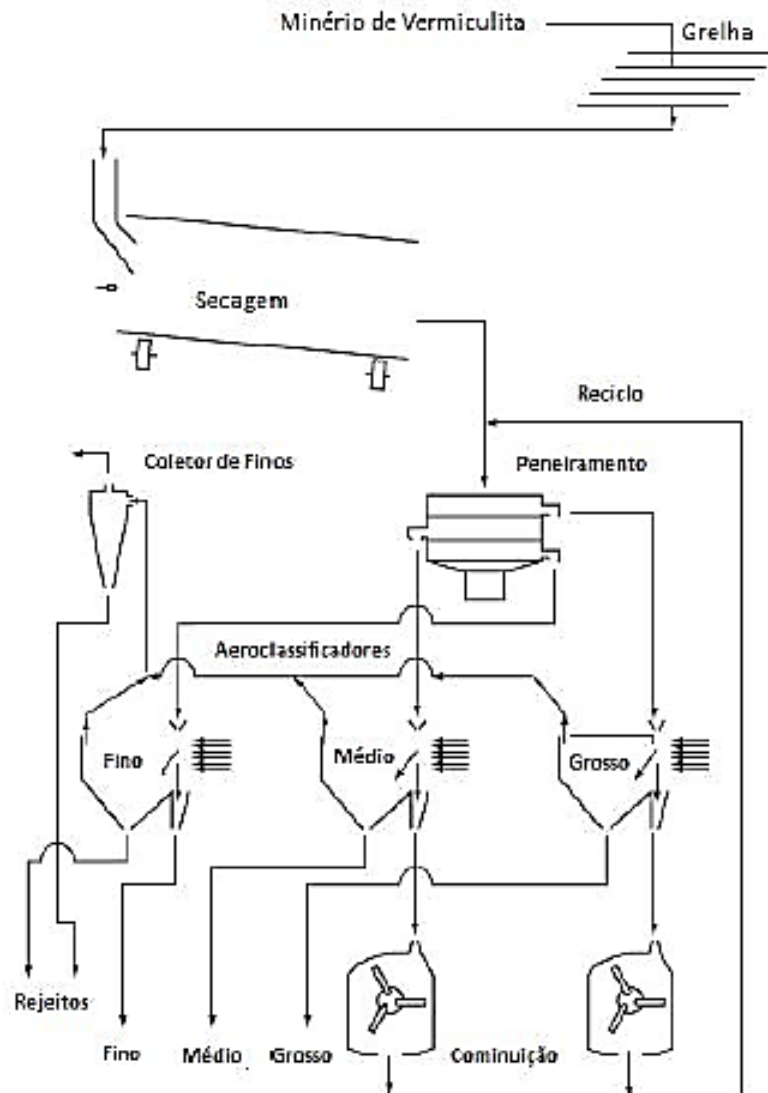


Figura 2.1: Processo de beneficiamento a seco, mais utilizado no Brasil.

Fonte: Sznelwar e Scalabrin (2009)

Tabela 2.4: Especificação da granulometria da vermiculita expandida

Especificação da Vermiculita Expandida					
Padrão Internacional		Padrão Americano		Padrão Brasileiro	
Classificação	Tamanho (mm)	Classificação	Tamanho (mm)	Classificação	Tamanho (mm)
Grossa	-5,2	1	-3,673	-	-
Média	-2,6	2	-1,75	Médio	55-95% > 2,4
Fina	-1,29	3	-1,4	Fino	65-95% > 1,2
Superfina	-0,645	4	-0,638	Superfino	70-95% > 0,6
Micrômetro	-0,46	5	-0,3	Micron	80-100 > 0,3

Fonte: Sznelwar e Scalabrin (2009)

A comercialização da vermiculita pode ser na forma natural (ver Fig. 2.2a) ou na forma expandida (ver Fig. 2.2b). Essa última responde por maior parte da demanda.



Figura 2.2: Amostras de vermiculita: (a) natural e (b) expandida

Fonte: Ugarte et al. (2005) apud Oliveira (2009)

A vermiculita expandida pode ser obtida por meio de aquecimento na faixa de temperatura entre 800 °C e 1000 °C, onde o material se expande, aumentando de volume em até 30 vezes devido à vaporização das moléculas de água que se encontram entre as camadas do minério (GENCEL et al., 2014). O processo de expansão ocorre principalmente em fornos a gás ou a óleo. O resultado é uma vermiculita expandida com baixa densidade (entre 0,15 e 0,25 g/cm³), área de superfície específica entre 6,0 e 8,0 m²/g e capacidade de troca catiônica elevada, entre outras características. Além de ter características interessantes no que diz respeito à isolamento termo-acústica (ver Tab. 2.5), o material é inodoro, inerte, não abrasivo e possui elevadas capacidades de absorção e adsorção (SOUZA, 2012).

Tabela 2.5: Propriedades térmicas da vermiculita em flocos

Propriedade	Unidade	Valor
massa específica, ρ	kg/m ³	80
condutividade térmica, κ	W/m °C	0,068
calor específico, C_p	kJ/kg °C	0,835

Fonte: OZISIK (1990)

As propriedades específicas da vermiculita tornam-a interessante para aplicação em diversos segmentos. Na agricultura, pode ser usada para melhorar o aproveitamento de água e de nutrientes pelas plantas, reduzindo custos e aumentando a produtividade de determinadas culturas, sendo um elemento fundamental na composição de substratos. Em siderurgia, é aplicada na forma concentrada para fundição de aço, promovendo aumento da produtividade e redução de consumo de energia. Na construção civil, destaca-se principalmente pela capacidade de isolamento termo-acústico e pela possibilidade de obtenção de elementos construtivos leves, permitindo ao projetista incorporar o material em projetos que adotam estratégias bio-climáticas para redução da energia necessária à obtenção de conforto termo-acústico em edificações (SZNELWAR e SCALABRIN, 2009). Esse último aspecto foi explorado no presente trabalho.

2.3. Comportamento térmico dos materiais

O calor é a energia térmica transferida em virtude da diferença de temperatura entre duas regiões de um mesmo sistema ou entre um sistema e sua vizinhança. A troca térmica entre sistema e vizinhança pode ocorrer por meio dos processos de condução, convecção e/ou radiação. Na condução, verificada principalmente em corpos sólidos, ocorrem interações entre partículas de diferentes níveis de energia interna (i.e., temperatura) por meio de fônons (quantidades específicas de vibração mecânica que se propagam através do material). A convecção, que caracteriza a troca de energia entre um sólido e um fluido adjacente, é uma composição dos processos de difusão térmica (interno ao sistema) e advecção (deslocamento de massa). A radiação consiste na interação à distância, por meio de ondas eletromagnéticas, entre sistemas com diferentes níveis energéticos. Deve-se ressaltar que os maiores coeficientes de transferência de calor estão associados aos processos de troca térmica onde há mudança de fase.

O estudo do comportamento térmico de um ambiente pode ser fundamentado em sua carga térmica (ÇENGEL, 2007), definida como a quantidade de calor que deve ser adicionada ou subtraída de um ambiente a fim de proporcionar uma

determinada condição desejada. No ambiente interior de uma edificação, consideram-se como determinantes da carga térmica os seguintes fatores: iluminação, número de ocupantes e equipamentos (SOUZA, 2012). Em regiões de baixas latitudes, entretanto, a radiação solar responde pela maior parcela da carga térmica no interior das edificações (BEZERRA e MARINHO, 2008).

Entre os fatores que determinam a taxa na qual o calor atravessa o envoltório de uma edificação, citam-se, entre outros: tipo de material, acabamento superficial, temperatura, área, massa, espessura, isotropia e posição. A influência desses fatores pode ser quantificada com base nas seguintes propriedades térmicas: condutividade, resistividade, capacidade calorífica, difusividade e massa específica.

2.3.1. Condutividade térmica

O estudo da transferência de calor por condução em sólidos é feito por meio da lei de Fourier, matematicamente expresso pela Eq. 1.

$$Q_k = -\kappa A \frac{dT}{dx} \quad (1)$$

A partir dela, determina-se o coeficiente de condutividade térmica (ver Eq. 2), definido pela quantidade de energia térmica transferida através de um corpo homogêneo, por unidade de tempo, de espessura e de gradiente de temperatura (OLIVEIRA, 2010).

$$\kappa = -q_k A \frac{dx}{dT} \quad (2)$$

Sendo: Q_k – taxa de transferência de calor (W)
 κ – condutividade térmica (W/m-°C)
 A – área da superfície transversal ao fluxo de calor (m²)
 $\frac{dT}{dx}$ – gradiente de temperatura (°C/m)

A variação da condutividade térmica com a temperatura, apesar de mensurável, é de tal ordem de grandeza que, na escala de interesse prático, pode-se usar um valor médio e, assim, considerar essa propriedade uma constante (SOUZA, 2012). O mesmo se aplica às outras propriedades dependentes da temperatura consideradas no presente trabalho (i. e., massa específica, capacidade calorífica volumétrica, resistividade térmica e difusividade térmica).

O coeficiente de condutividade térmica é uma das propriedades utilizadas para classificar os materiais em bons ou maus condutores de calor. Os condutores térmicos são em sua maioria metálicos e apresentam elevados valores de κ , consequência da maior vibração molecular. Os isolantes térmicos, geralmente constituídos por materiais orgânicos e fibrosos, apresentam grande dificuldade em transferir calor, apresentando valores baixos de κ (SOUZA, 2012).

O coeficiente κ assume papel determinante na escolha do material a ser empregado em qualquer elemento construtivo. Na Tabela 2.6, observam-se valores de κ dos principais isolantes térmicos empregados na construção civil.

Tabela 2.6: Condutividade térmica de materiais aplicados à construção civil

Materiais		k (W/m.K)	
Argamassas	comum	1,15	
	celular	0,4	
	de gesso (ou cal e gesso)	0,7	
Gesso	projetado ou de densidade elevada	0,5	
	placa de gesso; gesso cartonado	0,35	
	com agregado leve (vermiculita ou perlita expandida)	dosagem gesso:agregado= 1:1	0,3
		dosagem gesso:agregado= 1:2	0,25
Isolantes térmicos	lã de rocha	0,045	
	lã de vidro	0,045	
	poliestireno expandido moldado	0,04	
	poliestireno extrudado	0,035	
	espuma rígida de poliuretano	0,03	

Fonte: adaptado de NBR 15220-1

2.3.2. Resistividade térmica

Admitindo-se uma condução de calor unidimensional através da seção plana de uma placa, a taxa de transferência de calor através de uma área unitária, na direção normal ao fluxo, é dada por:

$$Q_k = Ak \frac{\Delta T}{L} \quad (3)$$

Isolando-se o termo relativo ao coeficiente de condutividade térmica, tem-se:

$$k = \frac{Q_k \cdot L}{\Delta T \cdot A} \quad (4)$$

Sendo: L – espessura do material (m)

ΔT – diferença de temperatura entre as faces da placa (°C).

A resistividade térmica de um material é definida como o recíproco da condutividade térmica. Logo, a partir da Eq. (4), chega-se às seguintes expressões:

$$r = \frac{1}{k} \quad (5)$$

E, a partir da Eq. 4:

$$r = \frac{\Delta T \cdot A}{Q_k \cdot L} \quad (6)$$

No Sistema Internacional de Unidades (SI), r é expressa em m.K / W. Essa propriedade está diretamente relacionada a resistência térmica (R), cuja unidade no SI é K/W. Admitindo-se um fluxo de calor através de uma área A de uma superfície submetida a uma diferença de temperatura ΔT , a resistência térmica será, portanto:

$$R = \frac{L}{A k} \quad (7)$$

ou

$$R = r \frac{L}{A} \quad (8)$$

Segundo Azevedo (2016), quanto maior o valor da resistividade térmica (r), e conseqüentemente, da resistência térmica (R), melhores forem as características do isolante térmico.

2.4.3. Capacidade calorífica

Propriedade que indica a quantidade de energia necessária à alteração da temperatura dos corpos quando esses são submetidos a uma fonte térmica de magnitude constante (CUNHA et al., 2013). É expressa matematicamente pelo produto da massa (m) pelo calor específico (c_p):

$$C = m \cdot c_p \quad (9)$$

Também pode ser expressa pelo produto da massa específica (ρ), do volume (V) e do calor específico, resultando na capacidade calorífica volumétrica, dada em $J/m^3.K$, ou seja:

$$C = \rho \cdot V \cdot c_p \quad (10)$$

2.4.4. Difusividade térmica

Representa a velocidade com que o calor flui através de um determinado material quando esse é submetido a variações de temperatura no tempo (OZISIK, 1990). É expressa em mm^2/s , sendo matematicamente dada por:

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho \cdot c_p} = \frac{\kappa}{C} \quad (5)$$

Como ilustração, considere-se um sólido semi-infinito que se estende desde $x=0$ até $x \rightarrow \infty$, inicialmente mantido em temperatura uniforme $T_0 = 100^\circ C$. No instante $t = 0$, a superfície em $x = 0$ é colocada em contato com um reservatório térmico mantido em $0^\circ C$. Verifica-se que a temperatura do sólido se alterará continuamente com a posição e com o tempo. A difusividade térmica pode ser

relacionada ao tempo necessário para que a temperatura do sólido em um ponto $x=30$ cm atinja $T = 50^{\circ}\text{C}$. Na Tabela 2.7, apresentam-se valores desse tempo para diferentes materiais. Percebe-se que, quanto maior a difusividade térmica, menor será o tempo necessário para que o calor atravesse o sólido (OZISIK, 1990).

Tabela 2.7: Efeito da difusividade térmica na taxa de propagação de calor

Material	Prata	Cobre	Aço	Vidro
α (mm ² /s)	170	103	12,9	0,59
Tempo	9,5min	16,5min	2,2h	2 dias

Fonte: OZISIK (1990).

2.4.5. Massa específica

É a relação entre a massa e o volume de uma substância. Na Tabela 2.8 apresentam-se valores de ρ de alguns materiais utilizados na construção civil.

Tabela 2.8: Massa específica de alguns materiais

Materiais		ρ (kg/m ³)	
Argamassas	comum	1800 - 2100	
	celular	600 - 1000	
	de gesso (ou cal e gesso)	1200	
Gesso	projetado ou de densidade elevada	1100 - 1300	
	placa de gesso; gesso cartonado	750 - 1000	
	com agregado leve (vermiculita ou perlita expandida)	dosagem gesso:agregado= 1:1	700 - 900
		dosagem gesso:agregado= 1:2	500 - 700
Isolantes térmicos	lã de rocha	20 - 200	
	lã de vidro	10 - 100	
	poliestireno expandido moldado	15 - 35	
	poliestireno extrudado	25 - 40	
	espuma rígida de poliuretano	35- 40	

Fonte: adaptado de NBR 15220-1

3. MATERIAL E PROCEDIMENTOS

No processo de incorporação de partículas de vermiculita expandida às pastas de gesso, buscou-se uma combinação de materiais que resultasse em um compósito que apresentasse como principais características: baixa condutividade térmica e alta resistividade térmica.

Para comprovação da hipótese desta pesquisa, o compósito foi analisado quanto às propriedades térmicas (condutividade, difusividade, capacidade calorífica e difusividade) e quanto ao desempenho térmico (variação de temperatura do compósito quando submetido à uma fonte térmica radiante).

3.1. Material

Com exceção do gesso e da vermiculita, obtidos com recursos próprios, os equipamentos e materiais utilizados neste trabalho foram obtidos por meio de recursos da UFRN.

3.1.1. Gesso

Utilizou-se *GessoMix*, indicado para revestimentos, acabamentos de alvenaria tradicional, pré-moldados de cimento, lajes, vigas e colunas de concreto de áreas internas, fabricado pela empresa *Rejuntamix*, que recomenda: para cada 1,0 kg de gesso, utilizar de 350 ml a 450 ml de água potável na formação da mistura. Na Fig. 3.1, observa-se o material utilizado neste trabalho.



Figura 3.1: O gesso utilizado no trabalho: (a) embalado; (b) pronto para ser adicionado à vermiculita

3.1.2. Água

Toda a água usada na produção das pastas, limpeza dos moldes e equipamentos, foi obtida da rede da UFRN – considerada potável pela concessionária local (CAERN).

3.1.3. Vermiculita expandida

Utilizou-se vermiculita expandida classificada pelo fabricante como sendo do tipo fina, resultante de peneiramento com peneira 14 mesh. O material estava no Laboratório de Transferência de Calor da UFRN, armazenado na embalagem em que foi comercializado (saco de papel Kraft 100 litros).



(a) (b)
Figura 3.2: A vermiculita expandida utilizada no trabalho:
(a) embalada; (b) pronto para ser adicionado ao gesso.

3.2. Procedimentos

Os trabalhos foram divididos em três etapas:

1^a - Seleção do material e definição de composições dos corpos de prova

2^a - Fabricação dos corpos de prova

3^a - Montagem e realização dos ensaios

Na primeira etapa, foram selecionadas massas de gesso e de vermiculita expandida. Foram preparadas dez composições de interesse para o estudo desenvolvido, que envolveram a substituição parcial do gesso pela vermiculita expandida nos teores de 0 %, 5 %, 10 %, 15 % e 20 %. Essa faixa foi adotada com base nas recomendações de Oliveira (2012), que considerou como adequado para obtenção de valores de propriedades mecânicas exigidas na fabricação de elementos construtivos um teor de vermiculita de até 20%.

As composições foram divididas em dois conjuntos, de acordo com a razão água / gesso. Essa estratégia foi adotada em função da informação do fabricante do gesso e do Trovão (2012), que recomendam quantidades mínima e máxima de água

que devem ser adicionadas à massa de gesso, sendo $A/G = 1$ a relação máxima para se obter uma massa trabalhável. Vale ressaltar que a relação água/gesso (A/G) é determinada pela quantidade (em mL) de água dividida pela quantidade (em gramas) de gesso a serem usadas na preparação da massa.

Na tabela 3.1, veem-se as combinações utilizadas na produção do compósito.

Tabela 3.1: Combinações de materiais utilizadas na produção do compósito.

Misturas	Gesso (%)	Vermiculita (%)	A/G
M1	100	0	0,45
M2	95	5	0,45
M3	90	10	0,45
M4	85	15	0,45
M5	80	20	0,45
M6	100	0	0,80
M7	95	5	0,80
M8	90	10	0,80
M9	85	15	0,80
M10	80	20	0,80

Na segunda etapa, moldes de aço em formato cilíndrico, com 100 mm de altura e 50 mm de raio, foram empregados na produção dos corpos de prova. Foram produzidos cinco corpos de prova para cada mistura considerada no estudo, totalizando 25 peças com $A/G = 0,45$ e 25 peças com $A/G = 0,80$ (ver Fig. 3.3).

Foi adotado o seguinte procedimento na fabricação de cada corpo de prova:

1. Pesagem das massas de gesso e de vermiculita expandida em uma balança digital, fabricada pela empresa K N Waagem (modelo KN 4000), com resolução de 0,01 g;
2. Mistura manual das massas secas em recipiente limpo, até obtenção de uma mistura homogênea;

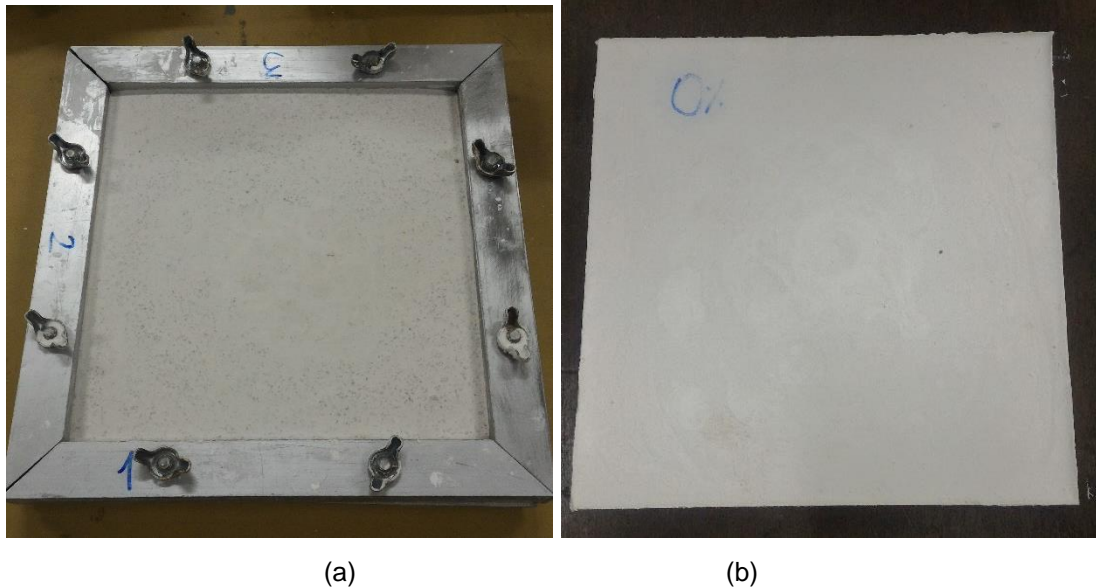
3. Medição da massa de água acondicionada em uma proveta; a água foi posteriormente despejada no recipiente de mistura;
4. Pulverização simultânea das massas de gesso e vermiculita expandida sobre a água acondicionada no recipiente de mistura;
5. Espera de 2 minutos para início do processo de hidratação do gesso;
6. Mistura manual do composto gesso / vermiculita expandida / água, até obtenção de pasta homogênea;
7. Moldagem da pasta do compósito em cilindro metálico; durante a moldagem, hastes de aço inoxidável em forma de “U” (gabaritos para inserção da sonda de medição) foram fixados na parte superior de cada corpo de prova;
8. Espera de 4 horas, até a pega do compósito;
9. Desmoldagem.



Figura 3.3: (a) molde; (b) corpos de prova cilíndricos prontos para ensaios de propriedades térmicas.

Para os ensaios de desempenho térmico, foram fabricadas placas planas quadradas, com dimensões 200 mm x 200 mm x 20 mm, utilizando-se um molde

metálico (ver Fig. 3.4). Foram fabricadas três placas para cada composição informada na Tab. 3.1. No processo de fabricação das placas, foram adotados os mesmos procedimentos de produção dos corpos de prova cilíndricos.



(a) placa de compósito no interior de molde;
(b) corpo de prova pronto para ensaios de desempenho térmico.

3.3. Técnicas de Caracterização

3.3.1. Ensaio para determinação de propriedades térmicas

As propriedades térmicas do compósito foram obtidas por meio do medidor KD – 2 Pro, fabricado pela Decagon Devices Incorporation, empregando-se a sonda SH – 1, própria para materiais sólidos ou granulares (ver Fig. 3.5). O equipamento utiliza o método da fonte de calor em linha transitória: em uma das duas agulhas da sonda há uma fonte de calor (resistência elétrica), que libera energia ao corpo de prova por efeito Joule; a outra agulha possui termopar que absorve a energia que atravessa o corpo de prova; após 15 minutos, o equipamento realiza a comparação entre as quantidades de energia liberada pela fonte de calor e absorvida pelo termopar, determinando os valores das propriedades térmicas de interesse: condutividade, resistividade, difusividade e capacidade calorífica volumétrica.



Figura 3.5: Sonda SH-1 do medidor de propriedades térmicas KD2 Pro

O procedimento adotado constou das seguintes etapas:

1. Conexão da sonda SH – 1 ao medidor KD – 2 Pro;
2. Acondicionamento do corpo de prova no interior de uma câmara de isolamento térmica;
3. Cobertura das agulhas da sonda com pasta térmica, para eliminar o ar entre as agulhas e as paredes do corpo de prova;
4. Inserção das agulhas da sonda SH – 1 no interior do corpo de prova;
5. Fechamento da câmara de isolamento com fita adesiva;
6. Acionamento do medidor KD – 2 Pro e início da medição

Cada corpo de prova foi ensaiado três vezes. Entre cada medição, fez-se um intervalo de 15 minutos, recomendado pelo fabricante para que o calor liberado na amostra se dissipe e não interfira na medição seguinte. Na Figura 3.6, observa-se o conjunto câmara de isolamento térmica e medidor de propriedades físicas.



Figura 3.6: Bancada com KD2-Pro e câmara térmica

3.3.2. Ensaio para determinação de desempenho térmico

Realizado para análise do comportamento térmico do compósito durante os processos de aquecimento e resfriamento, consistiu em submeter o compósito a uma fonte térmica radiante e, em seguida, após supressão da fonte, aguardar pelo resfriamento. Para monitoramento da temperatura, utilizou-se um sistema de aquisição de dados por computador, com 16 canais para sensor termopar. Foram utilizados 12 termopares tipo T (cobre – constantan), indicado para uso em atmosferas oxidantes, redutoras ou inertes, capaz de trabalhar entre temperaturas de -190°C a 370°C (BEZERRA, 2003). Os termopares utilizados neste trabalho foram fabricados e calibrados no Laboratório de Transferência de Calor da UFRN. A placa de compósito foi montada em uma câmara de testes, termicamente isolada por placas de EPS (ver Fig. 3.7). Quatro termopares foram instalados em cada montagem, sendo um em cada face da placa, um no meio e outro no fundo da câmara de testes (ver Fig. 3.8).

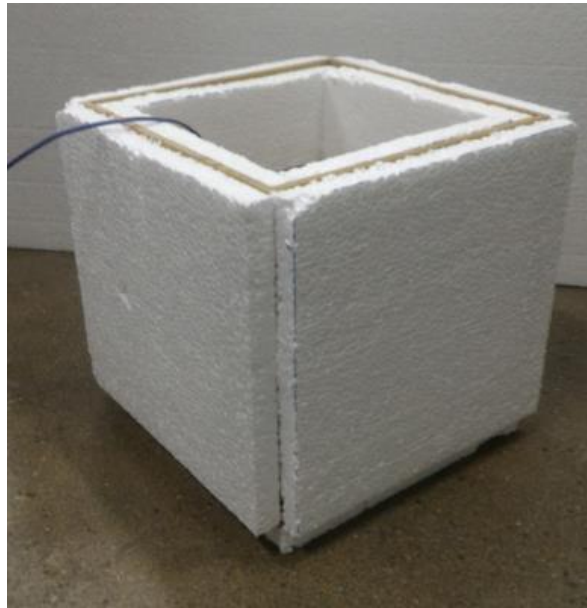


Figura 3.7: Câmara de testes

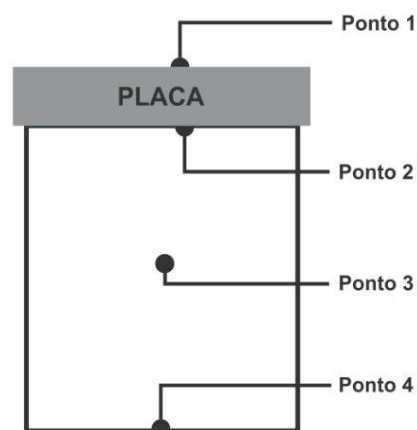


Figura 3.8: Disposição dos termopares na placa e no interior da câmara.

Realizou-se um ensaio preliminar, onde foram determinados os intervalos de tempo para estabilização (regime permanente) para os processos de aquecimento (seis horas) e resfriamento (duas horas) do conjunto compósito – câmara. Desse modo, cada ensaio consumiu oito horas de medições.

O aquecimento foi obtido por meio de uma fonte de radiação artificial, composta de 24 lâmpadas incandescentes de 100 W cada (ver Fig. 3.9). Cada câmara de testes foi posicionada a uma distância de 1,20 m das lâmpadas, resultando em uma temperatura máxima na superfície externa do compósito em torno de 40 °C. Os ensaios foram realizados em sala com temperatura controlada, mantida em torno de 24 °C durante os dois processos (aquecimento e resfriamento).



Figura 3.9: Fonte de radiação térmica artificial

Na Fig. 3.10, observa-se o conjunto fonte – câmara – compósito durante ensaio. O procedimento adotado nos ensaios constou das seguintes etapas:

1. Furação dos três corpos de prova de cada configuração do compósito nas faces superior e inferior das placas;
2. Fixação dos termopares nas faces superior e inferior das placas;
3. Fixação dos termopares na base e no ar (meio) da câmara;
4. Fixação das placas nas câmaras de testes;
5. Montagem das câmaras de testes sob a fonte de radiação térmica artificial;
6. Conexão dos termopares ao sistema de aquisição de dados e conexão do sistema de aquisição de dados ao computador;
7. Climatização da sala;
8. Acionamento do computador e início da gravação de dados;
9. Acionamento da fonte de radiação térmica artificial;

10. Aguardar 6 horas (fase de aquecimento);
11. Desligamento da fonte de radiação térmica artificial;
12. Aguardar 2 horas (fase de resfriamento);
13. Coleta de dados do computador para análise;
14. Aguardar 12 horas para repetição do ensaio.



Figura 3.10: Ensaio de desempenho térmico em fase de aquecimento

Próximo passo é análise dos dados de temperatura coletados. Esses serviram para gerar gráficos, semelhantes aos exibidos aqui abaixo, que mostram todo o comportamento térmico dos compósitos na fase de aquecimento e resfriamento. O propósito foi identificar os seguintes aspectos:

- Temperatura máxima no ponto 1, pois indica qual material tem mais resistência à passagem de calor;
- Diferença de temperatura entre os pontos 1 e 4 nas 10 misturas (regime permanente - fase de aquecimento), pois é interessante saber quanto é

essa diferença num ponto que está distante 300mm da face em que a radiação térmica incide;

- Diferença de temperatura entre os pontos 1 e 2 (após a fase de resfriamento de 2h), pois é interessante saber quanto calor é dissipado pelos compósitos num intervalo de tempo fixo;

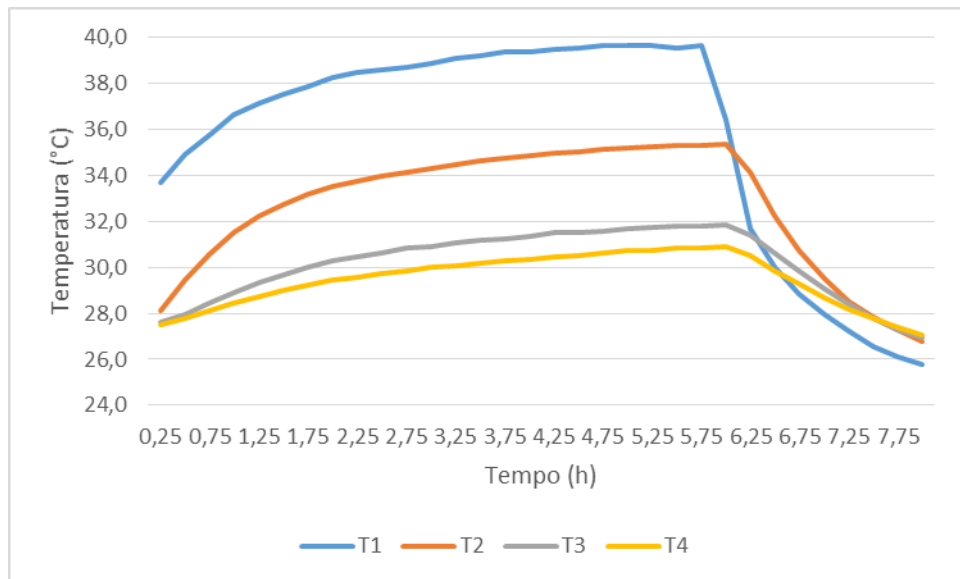


Gráfico 3.1: Curvas de temperaturas médias dos compósitos de mistura M5

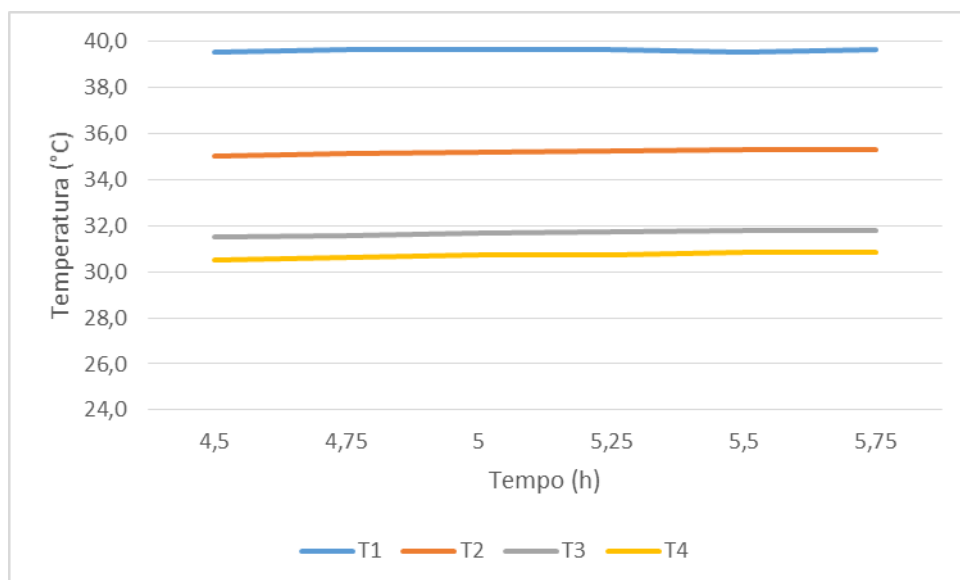


Gráfico 3.2: Regime permanente na fase de aquecimento da mistura M5

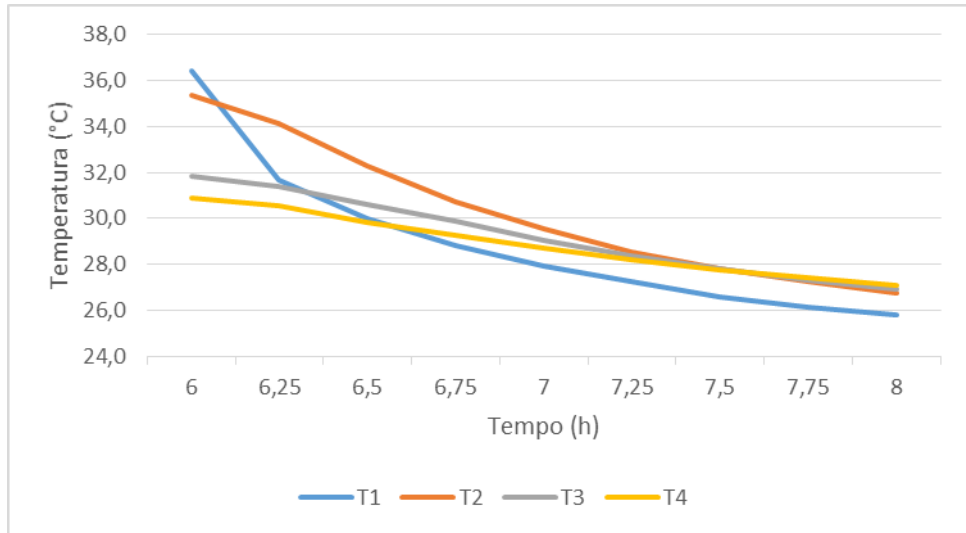


Gráfico 3.3: Fase de resfriamento da placa M5

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nos dados coletados, foram realizadas as análises das propriedades térmicas e do desempenho do compósito durante os processos de aquecimento e resfriamento.

4.1. Propriedades térmicas

Os dados dos 50 corpos de prova cilíndricos foram organizados em tabelas e utilizados na construção de gráficos, de acordo com cada propriedade térmica. Os pontos plotados nos gráficos corresponde aos valores médios.

4.1.1. Massa específica

Nos Gráficos 4.1 e 4.2 apresentam-se os resultados da variação da massa específica (ρ) em função da porcentagem de vermiculita expandida adicionada ao compósito e da razão água/gesso.

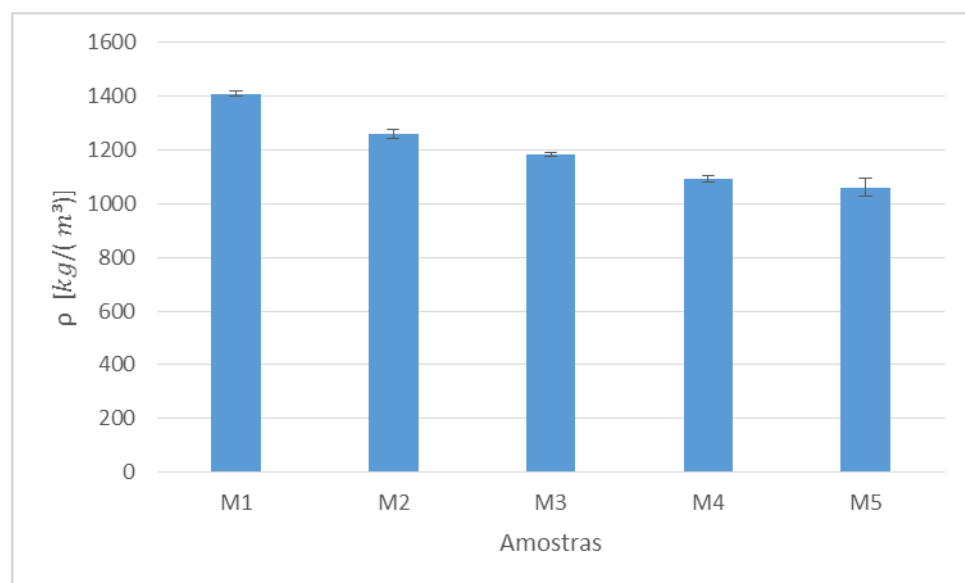


Gráfico 4.1: Variação da massa específica das misturas com A/G=0,45

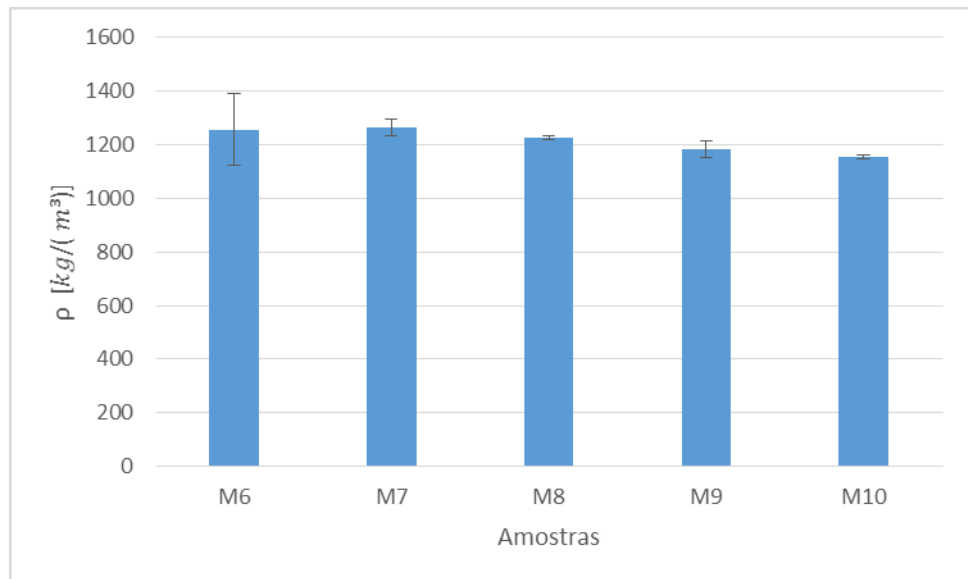


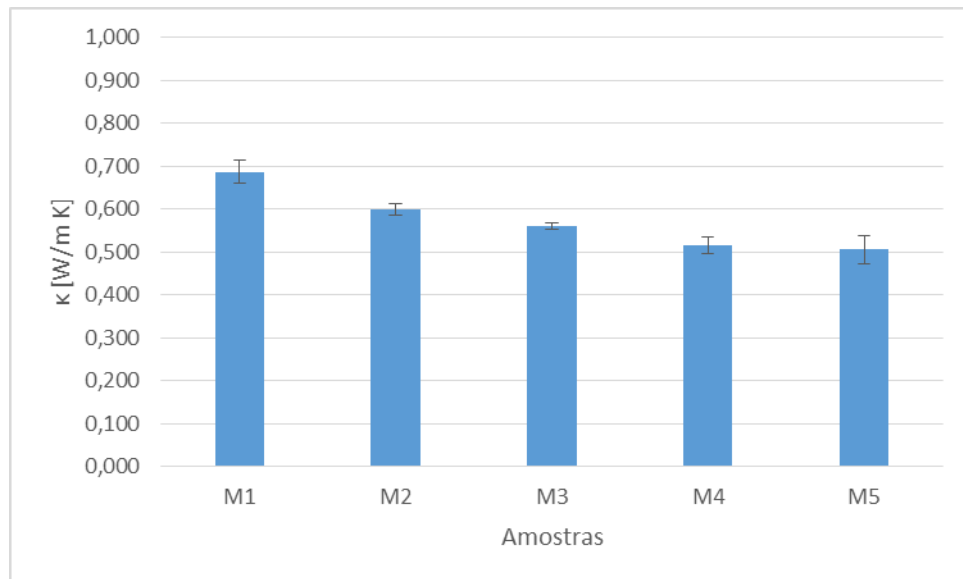
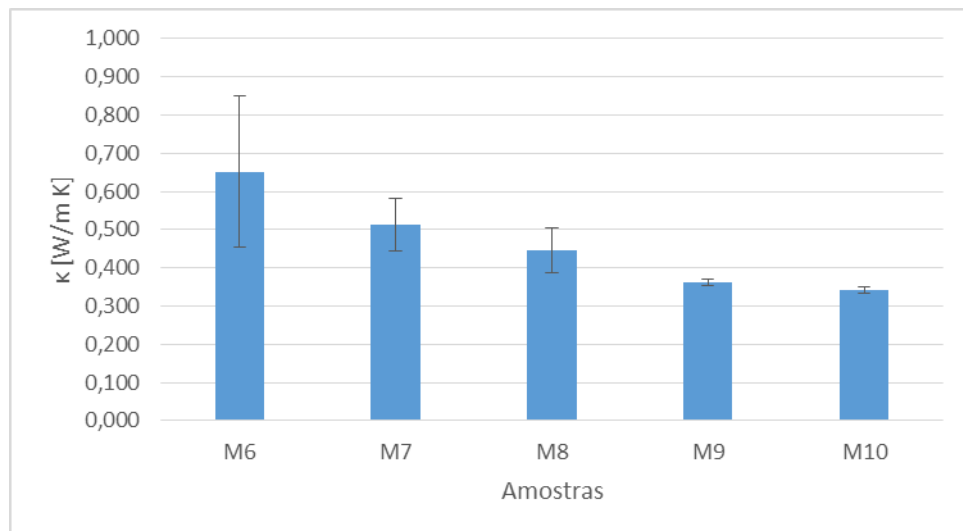
Gráfico 4.2: Variação da massa específica das misturas com A/G=0,80

Houve uma redução aproximadamente linear de ρ em função do percentual de vermiculita expandida adicionada em substituição ao gesso. Sendo um material poroso e menos denso que o gesso, a vermiculita expandida causou diminuição da massa específica do compósito, como era esperado. Por outro lado, observou-se redução de ρ com o aumento da razão A/G, o que justifica-se pela aumento da porosidade do compósito.

Vale ressaltar que é possível diminuir ainda mais o ρ com o aumento da porcentagem de vermiculita expandida, no entanto, não foi feito isso devido as más condições de trabalhabilidade da massa no estado fresco.

4.1.2. Condutividade térmica

Nos Gráficos 4.3 e 4.4 observam-se os resultados da variação da condutividade térmica (κ) em função da porcentagem de vermiculita expandida adicionada ao compósito e da razão água/gesso.

Gráfico 4.3: Condutividade térmica das misturas com $A/G=0,45$ Gráfico 4.4: Condutividade térmica das misturas com $A/G=0,8$

Constatou-se uma redução linear do valor de κ com o aumento do percentual de vermiculita expandida adicionada ao compósito. A redução foi mais significativa nas misturas com $A/G = 0,8$. Na comparação dos valores obtidos para as misturas $M1 \leftrightarrow M5$ e $M6 \leftrightarrow M10$, verificaram-se reduções de 26 % e 48 %, respectivamente. Ou seja, quanto maior a razão A/G e a maior percentagem de vermiculita expandida, maior será a isolamento térmico do compósito (maior porosidade, como já foi mencionado anteriormente).

Por ser expandida, a vermiculita incorpora ar em seu interior. Uma vez que a condutividade média do ar é de aproximadamente $0,02 \text{ W/m.K}$ (OZISIK, 1990), a condutividade térmica efetiva diminui com o aumento da adição de vermiculita (e ar)

ao compósito. Segundo Souza (2012), a adição de vermiculita confere ao compósito boas propriedades de isolamento térmico, o que está em consonância com o resultado obtido.

4.1.3. Resistividade térmica

Nos Gráficos 4.5 e 4.6 são exibidos as variações da resistividade térmica (r) em função do aumento da porcentagem de vermiculita expandida adicionada ao compósito e da razão água/gesso (A/G).

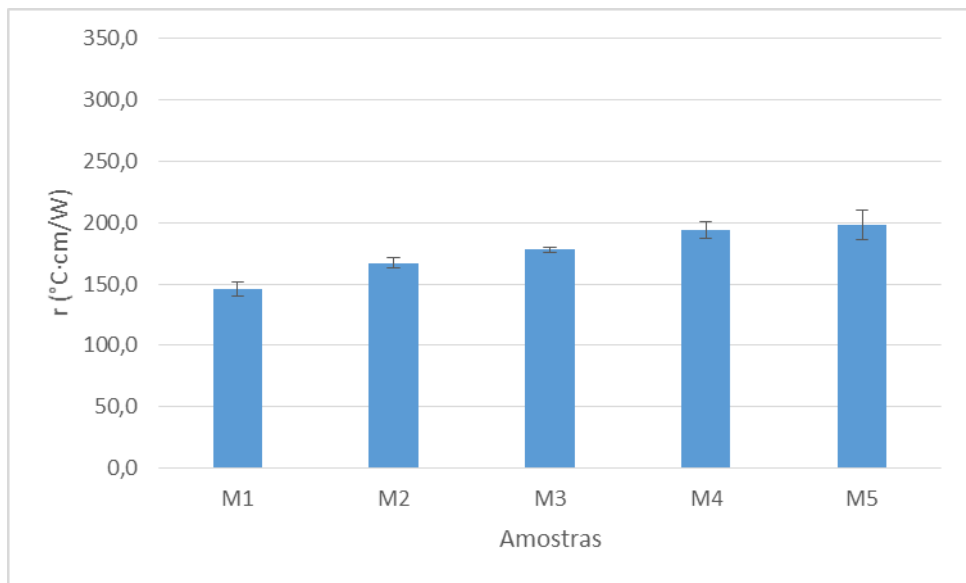


Gráfico 4.5: Resistividade térmica das misturas com A/G=0,45

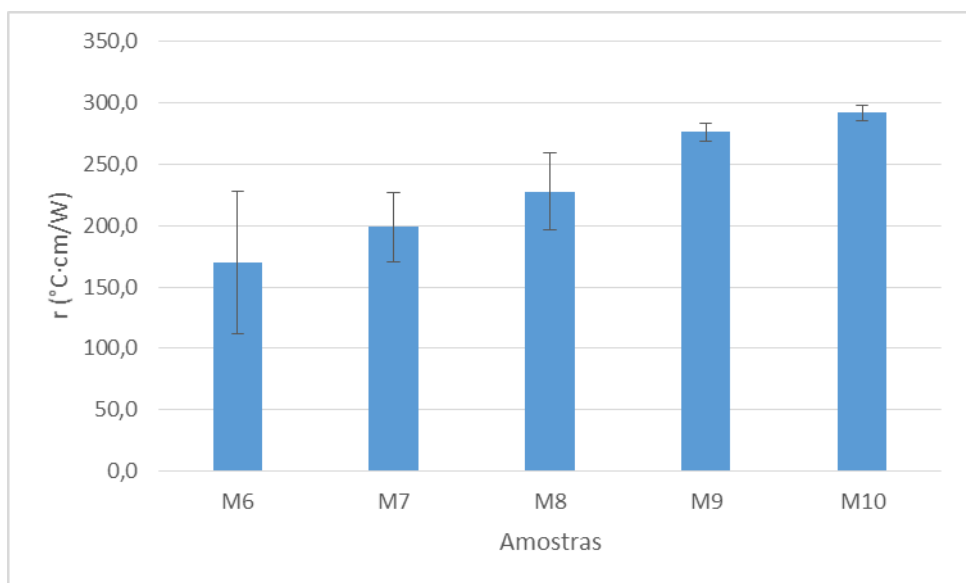


Gráfico 4.6: Resistividade térmica média das misturas com A/G=0,80

A resistividade térmica quantifica a capacidade de um material resistir à passagem de calor. Sendo r recíproca à condutividade térmica (κ), a adição de vermiculita expandida aumenta a resistividade térmica na mesma proporção que diminuiu a condutividade térmica. Na comparação dos valores obtidos para as misturas M1↔M5 e M6↔M10, verificou-se aumento de 36 % e 72 %, respectivamente. Portanto, constata-se que o aumento da razão A/G resultou no aumento de r do compósito. Como já mencionado anteriormente, quanto maior a razão A/G (e maior porcentagem de vermiculita expandida), maior será a isolamento térmica do compósito.

4.1.4. Capacidade calorífica volumétrica

Nos Gráficos 4.7 e 4.8, veem-se os resultados da variação da capacidade calorífica volumétrica (C) das misturas em função da porcentagem de vermiculita expandida adicionada ao compósito e da razão água/gesso.

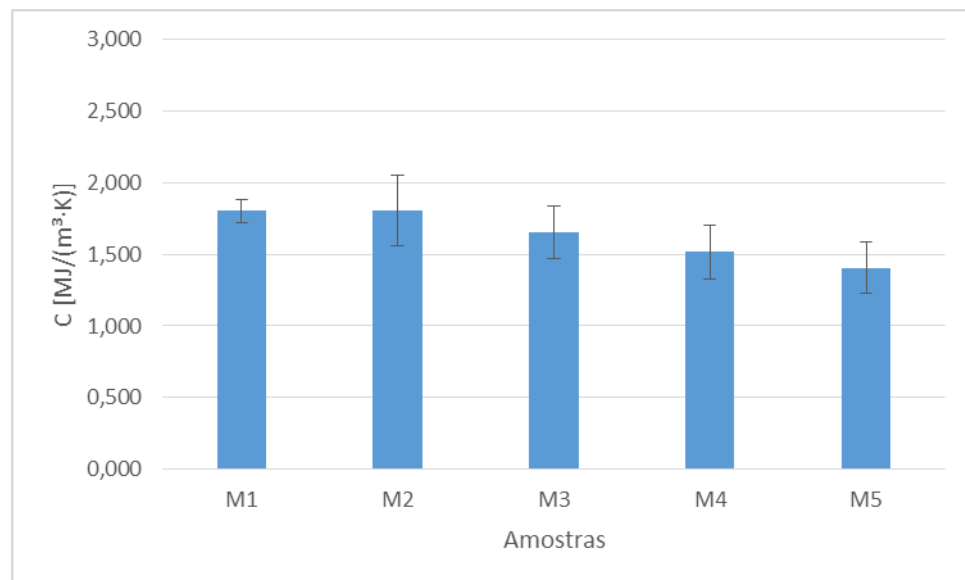


Gráfico 4.7: Capacidade calorífica das misturas com A/G=0,45

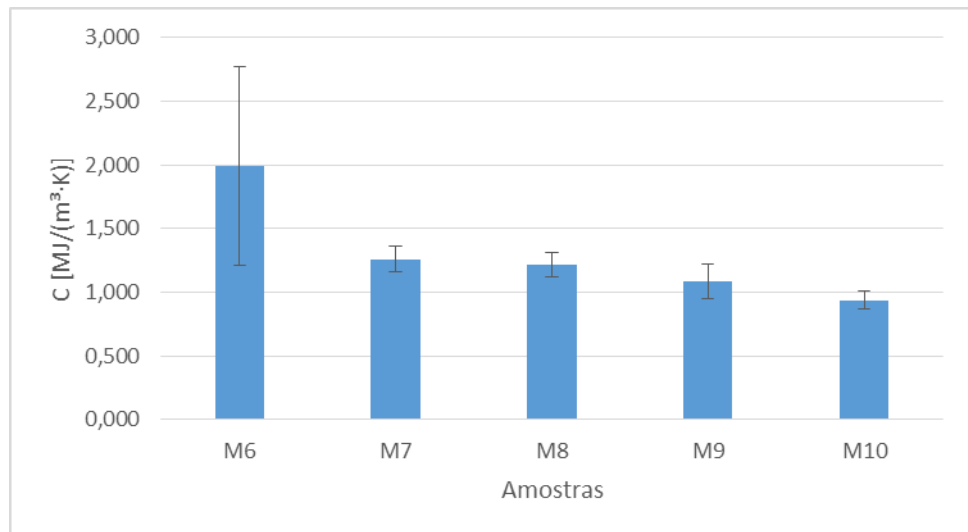


Gráfico 4.8: Capacidade calorífica das misturas com A/G=0,80

Observou-se que a mistura M6 apresentou a maior valor de C dentre as misturas analisadas. A redução de C de compósitos com razão A/G = 0,8 somente se tornou significativa acima de 5 % de adição de vermiculita. De acordo com Ozisik (1990), a vermiculita possui um valor de C de aproximadamente 0,067 MJ/m³.°C. Portanto, a adição da vermiculita resulta na redução da capacidade calorífica volumétrica efetiva das misturas.

4.1.5. Difusividade térmica

Nos Gráficos 4.9 e 4.10 encontram-se os resultados da difusividade térmica (α) em função da porcentagem de vermiculita expandida adicionada ao compósito e da razão água/gesso.

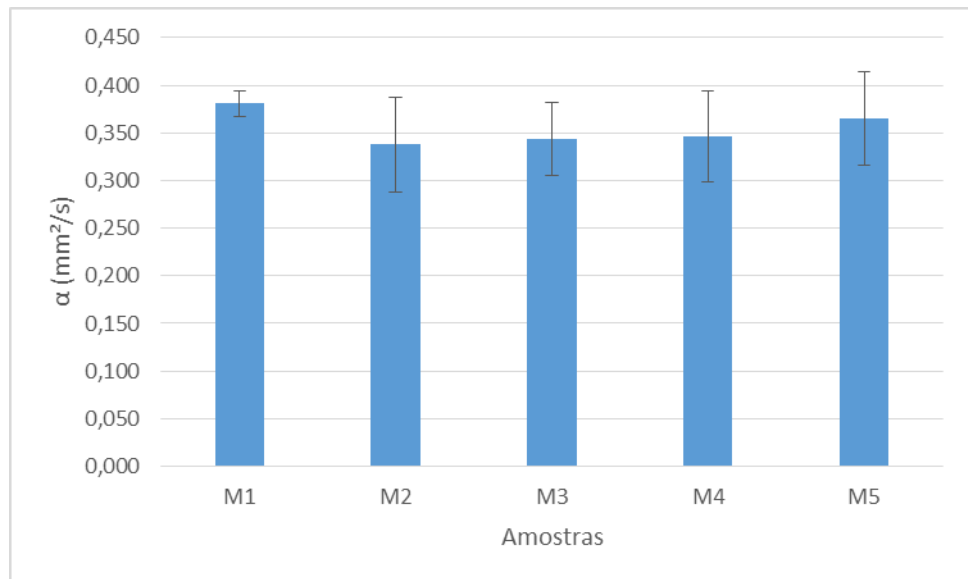


Gráfico 4.9: Difusividade térmica das misturas com A/G=0,80

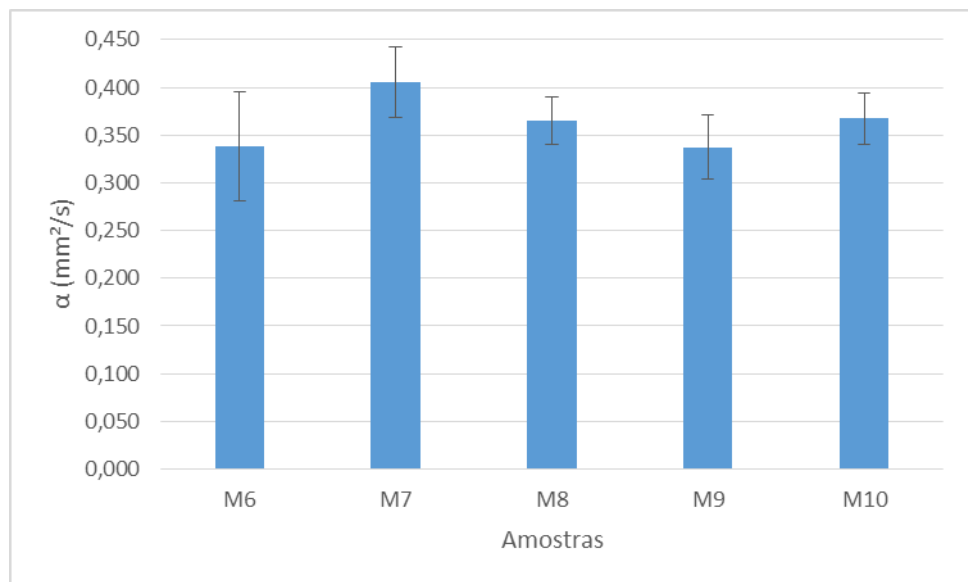


Gráfico 4.10: Difusividade térmica das misturas com A/G=0,80

Nessa análise, deve-se considerar as demais propriedades que definem α , ou seja: condutividade (κ), massa específica (ρ) e capacidade calorífica (C). Verificou-se que para $A/G = 0,45$ a difusividade térmica média da amostra padrão M1 (i. e., sem vermiculita expandida) foi maior, em consequência da maior condutividade térmica do gesso. No entanto, a adição de vermiculita expandida resultou na redução de α , com a mistura M2 apresentando a maior redução (cerca de 11%) em relação ao padrão (M1). Nas misturas com $A/G = 0,80$ não foram observadas qualquer tendência à linearidade – seja de aumento ou de redução do valor de α – em relação ao aumento da percentagem de vermiculita adicionada à mistura. A

amostra padrão M6 (i. e., sem adição de vermiculita) apresentou baixa difusividade, resultado da maior capacidade calorífica da água, ou seja, a maior relação A/G correspondeu a um maior valor de α . A mistura M9 (com 15% de vermiculita) também apresentou baixa difusividade térmica, isso porque houve um equilíbrio entre os efeitos da condutividade térmica, da massa específica e da capacidade calorífica volumétrica, evidenciando que quanto menor o valor de α maior o tempo necessário para que o calor se propague através do sólido.

4.2. Desempenho térmico do compósito

A partir do Ensaio de desempenho térmico das 30 placas do compósito (três placas para cada uma das dez composições), constatou-se que não foram observados grandes desvios nos valores de temperaturas para o mesmo ponto de medição, no intervalo de tempo, entre as amostras de mesma composição. Entre os fatores que contribuíram para esse resultado, destacam-se: o controle térmico da sala, a estabilidade da fonte de radiação, os procedimentos adotados na fabricação e calibração dos termopares, os cuidados na fabricação das amostras e na montagem dos experimentos.

O Gráfico 4.11 exibe as curvas de temperaturas média do ensaio de desempenho térmico da Mistura M4, na qual observou-se o maior desvio padrão (1,55 °C) dentre todas as misturas. Porém, vale destacar que esse desvio foi na fase de aquecimento quando ainda não havia sido atingido o regime permanente do conjunto placa-câmara.

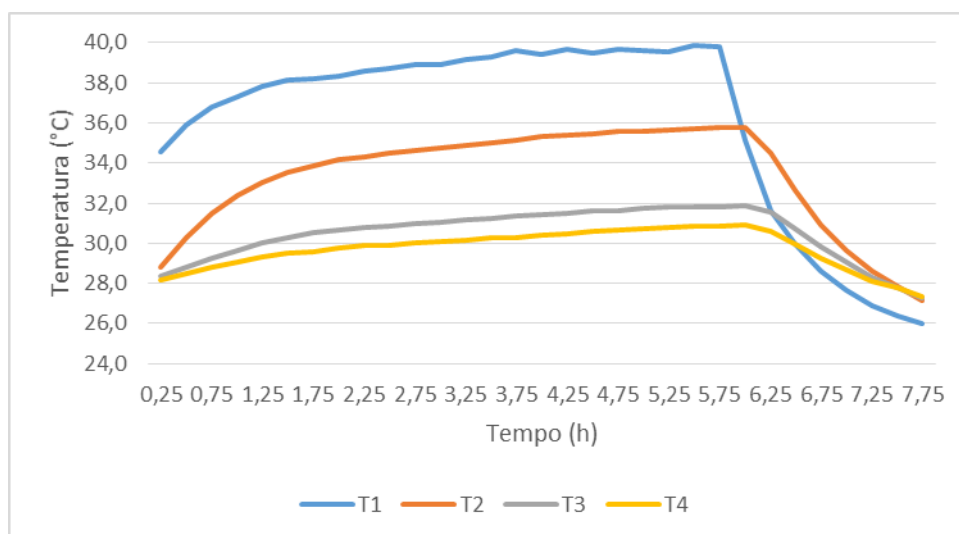


Gráfico 4.11: Ensaio de desempenho térmico da mistura M4

4.2.1 Comportamento térmico durante a fase de aquecimento

Sabe-se que a fase de aquecimento teve duração total de 6 horas, na qual o conjunto placa-câmara atingiu o regime permanente após 4,5 horas. Considerando-se os valores máximos de temperatura, as maiores temperaturas na face externa (T1) foram obtidas nas misturas M4 e M5, como mostra os Gráficos 4.12 e 4.13. Esse resultado está em conformidade com os resultados obtidos para o comportamento da capacidade calorífica volumétrica (C).

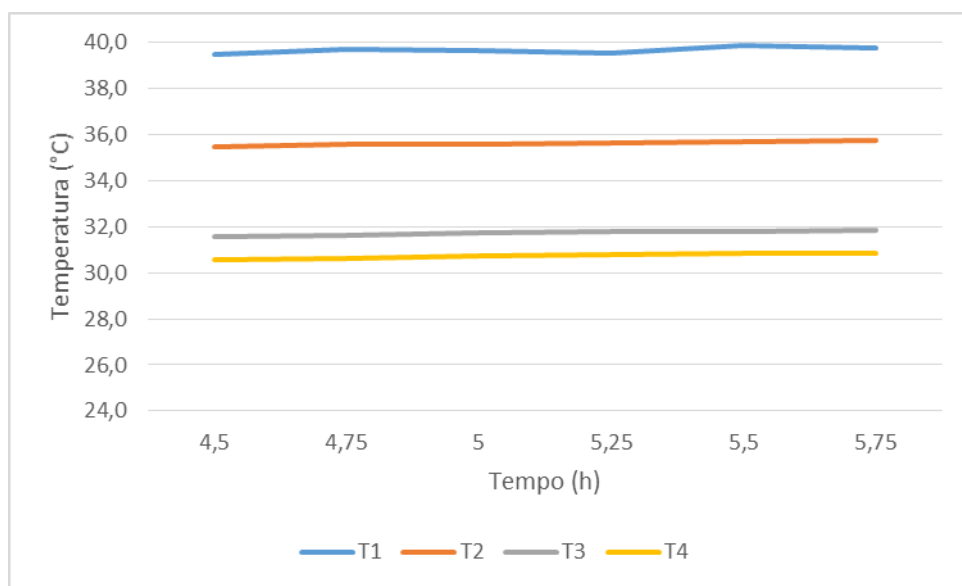


Gráfico 4.12: Regime permanente da mistura M4

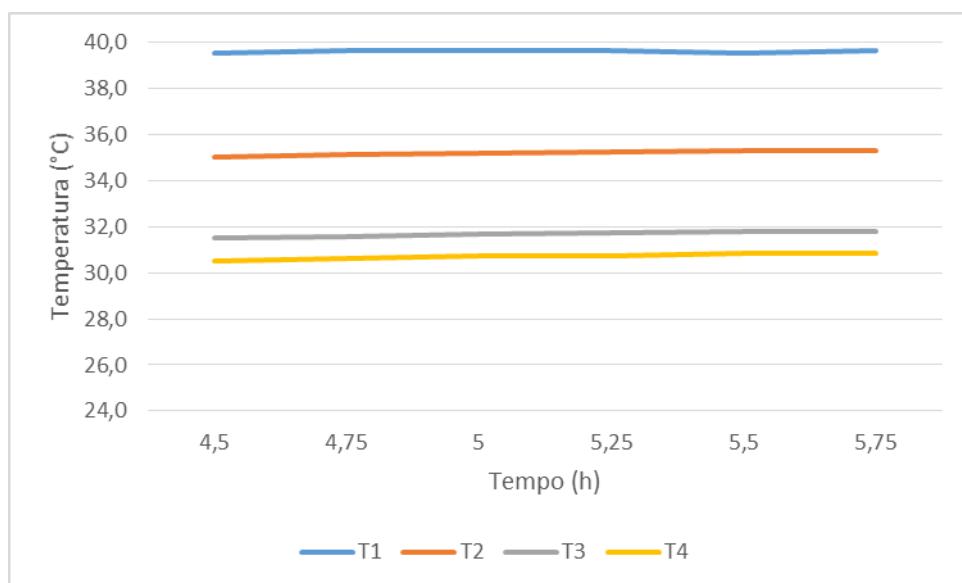


Gráfico 4.13: Regime permanente da mistura M5

As Tabelas 4.1 e 4.2 exibem a diferença de temperatura entre pontos de interesse: entre os pontos 1 e 2 que estão posicionados na placa, em extremidades opostas; e entre os pontos 1 e 4, na qual o ponto 1 está posicionado na face da placa em que incide a radiação térmica e o ponto 4 está na base da câmara.

Tabela 4.1: ΔT entre pontos no regime permanente para $A/G=0,45$

	$\Delta T(1-2)$	$\Delta T(1-4)$
M1	2,5	7,1
M2	2,9	7,4
M3	2,9	7,4
M4	4,1	9,0
M5	4,3	8,8

Tabela 4.2: ΔT entre pontos no regime permanente para $A/G=0,80$

	$\Delta T(1-2)$	$\Delta T(1-4)$
M6	2,8	7,1
M7	2,8	7,4
M8	2,6	6,8
M9	2,9	7,0
M10	3	7,0

Observando esses resultados, viu-se que a mínima e a máxima diferença de temperatura entre os pontos 1 e 4, que estão distantes entre por 300mm, foram de 6,8°C e 9°C, respectivamente; e entre os pontos 1 e 2, a maior diferença de temperatura foi obtida nas misturas com adição máxima (20 %) de vermiculita. Esse resultado está em conformidade com os resultados obtidos para o comportamento da capacidade calorífica volumétrica (C) e, ainda, evidencia o fato de que quanto maior a porcentagem de vermiculita adicionada, maior a capacidade de isolamento térmica do compósito. Também foi constatado que o aumento da razão A/G alterou a capacidade de isolamento térmica, demandando maiores porcentagens de vermiculita para aumentar a diferença de temperatura entre as faces da placa do compósito.

4.2.2. Comportamento térmico durante a fase de resfriamento

Percebeu-se que, após o desligamento da fonte de radiação térmica, independente da composição, a face exposta da placa (ponto 1) apresentou maior variação de temperatura, ou seja, a perda de calor ocorreu mais rapidamente. Em

relação à face interna (ponto 2), as misturas com $A/G = 0,8$ apresentaram maiores reduções de temperatura, onde a mistura M7 teve a maior variação ($9,8\text{ }^{\circ}\text{C}$), como pode ser observado no Gráfico 4.14. Esse resultado está de acordo com o comportamento verificado na análise da difusividade térmica (α), quando a mistura M7 apresentou o maior valor de α entre todas as misturas consideradas no presente estudo.

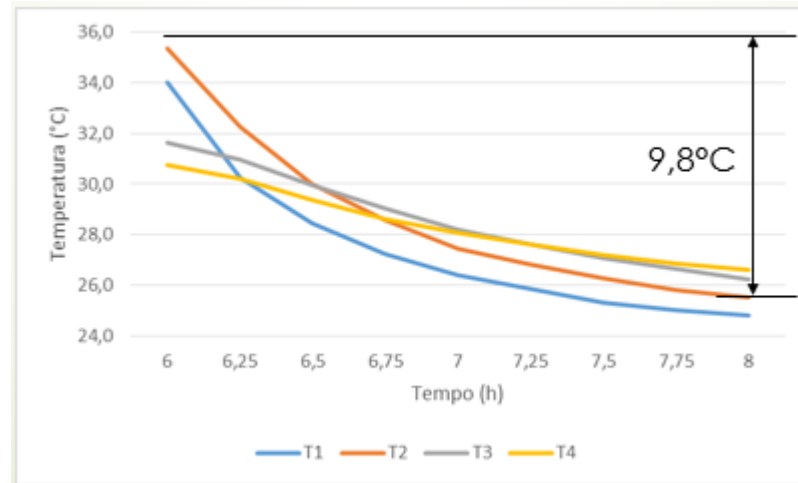


Gráfico 4.14: Fase de resfriamento da placa M7

Foi observado que as misturas com 15 % de adição de vermiculita (M4 e M9) apresentaram menores variações de temperatura nas superfícies da placa do compósito, fato explicado em razão dos baixos valores de α dessas composições. E também avaliou-se quanto tempo foi necessário para que a temperatura do ponto 2 resfriasse em aproximadamente 6°C , na qual os resultados estão exibidos nas tabelas 4.3 e 4.4. Percebeu-se que, quanto menor a difusividade térmica, maior foi o tempo necessário para que o calor fosse transmitido pelo sólido.

Tabela 4.3: Efeito da difusividade térmica na taxa de propagação de calor nos compósitos com $A/G=0,45$

Material	M1	M2	M3	M4	M5
α (mm^2/s)	0,38	0,34	0,34	0,35	0,36
Tempo	60	75	75	60	60

Tabela 4.4: Efeito da difusividade térmica na taxa de propagação de calor nos compósitos com $A/G=0,80$

Material	M6	M7	M8	M9	M10
α (mm^2/s)	0,34	0,41	0,37	0,34	0,37
Tempo	60	45	60	60	75

5. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta a análise dos resultados referentes ao desenvolvimento de um novo material compósito produzido a partir do gesso e da vermiculita expandida.

A metodologia experimental usada foi considerada satisfatória ao objeto da pesquisa, proporcionando a análise do comportamento térmico do compósito e, ainda, enfatizando propriedades térmicas que servem de indicativos à aplicações do material desenvolvido enquanto substituto do gesso comum.

Na formação do compósito, estabeleceu-se o valor de 20 % como limite de adição de vermiculita expandida em substituição ao gesso, para composições com A/G de 0,45 e 0,8.

Segundo a NBR 15220, a argamassa comum e o gesso projetado têm valores de condutividade térmica de 1,15 e 0,50 W/m.K, respectivamente. A condutividade do compósito desenvolvido variou entre 0,34 e 0,59 W/m.K, atingindo valores mais baixos que a da argamassa comum e do gesso projetado. Os valores determinados para as outras propriedades térmicas das misturas permitiram atestar que o compósito se presta para aplicação como material de isolamento térmica a ser utilizado na produção de elementos construtivos.

A massa específica do compósito desenvolvido variou entre 1.061 e 1.264 kg/m³. Como a argamassa de gesso apresenta $\rho = 1.200$ kg/m³, caso venha a ser utilizado na construção civil em situações em que não requeira esforços mecânicos elevados, o compósito permitirá produção de elementos construtivos mais leves.

Quanto ao desempenho térmico, os resultados dos ensaios permitiram atestar a capacidade do compósito desenvolvido em reduzir a transferência de calor entre o ambiente e o interior da câmara de testes. Na medida em que aumentou o teor de vermiculita expandida adicionado ao compósito, aumentou sua capacidade de isolamento. As misturas com adições de 15 % e 20 % de vermiculita mostraram-se as mais eficientes. Foi identificada uma redução da capacidade de isolamento térmica do

compósito em função do aumento da razão A/G, o que não compromete à aplicação das misturas dessa categoria na construção civil, uma vez que suas propriedades térmicas apresentaram valores típicos de materiais de isolamento térmica.

O compósito desenvolvido (*Gessulita*), apresentou características superiores quando comparado ao gesso, sendo, portanto, um material com potencial para uso como isolante térmico na produção de elementos construtivos que proporcionem redução da carga térmica no interior de edificações, contribuindo, dessa forma, para conservação de energia.

6. BIBLIOGRAFIA

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15220: Desempenho térmico de edificações. 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE REFRIGERAÇÃO, AR CONDICIONADO, VENTILAÇÃO E AQUECIMENTO (ABRAVA). O consumo de energia elétrica nas edificações do Brasil. Disponível em: <<http://abrava.com.br/?p=4092>>. Acesso em: Julho de 2016.

AZEVEDO, C. C. de A.; SANTOS, I. I. J. dos; MARINHO, G. S. Análise de propriedades termofísicas de compósito para isolamento térmica. Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), Fortaleza/CE, 2016.

BEZERRA, L. A. Análise de desempenho térmico de sistema construtivo de concreto com EPS como agregado graúdo. 64p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2003.

BEZERRA, L. A. C.; MARINHO, G. S. Elementos de alvenaria termo-isolante produzidos com poliestireno expandido reciclado. Mens Agitat, v. 3, p. 17-26, 2008.

BORREGUERO, A. M.; SERRANO, A.; GARRIDO, I.; RODRÍGUEZ, J. F.; CARMONA, M. Polymeric-SiO₂-PCMs for improving the thermal properties of gypsum applied in energy efficient buildings. Journal Energy Conversion and Management, n. 87, p.138–144, 2014.

COUTINHO, A. S. Conforto e Insalubridade Térmica em Ambientes de Trabalho. UFPB/Editora Universitária. 1998.

CUNHA, P. W.; GOMES, U. U.; SIVAM, R. L.; MARINHO, G. S. Propriedades termofísicas de compósito de matriz de gesso e fibra vegetal. HOLOS, 12p, 2013.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). Disponível em: <http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Consumonacionaldeenergiael%C3%A9trica porclasse%E2%80%931995-2009.aspx>. Acesso em: Março de 2016.

GENCEL, O.; DIAZ, J. J. de C.; SUTCU, M.; KOKSAL, F.; RABANAL, F.P.A.; MARTINEZ-BARRERA, G.; BROSTOW, W. Properties of gypsum composites containing vermiculite and polypropylene fibers: Numerical and experimental results. *Journal Energy and Buildings*, n. 70, p. 135–144, 2014.

ÇENGEL, Y. A. Transferência de calor e massa. New York: Mc Graw Hill. 2007.

GODINI, C. Cerca de 50% da energia é consumida pelos sistemas prediais. Disponível em: <<http://www.engenhariae arquitetura.com.br/noticias/1223/Cerca-de-50-da-energia-e-consumida-pelos-sistemas-prediais.aspx>> Acesso em: Setembro de 2015.

LEITÃO, M. A. Gesso: conhecimento e uso na engenharia. Congresso brasileiro de ensino em engenharia (COBENGE), 8p, 2005.

MACIEIRA, R. P. Produção de compósito do tipo gesso-polímero para aplicação na fabricação de painéis externos em edificações. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais) – Programa de Pós Graduação da Universidade Católica de Pernambuco, Recife, 2011.

OLIVEIRA, M. C. Compósito de poliuretano de mamona e resíduo industrial para isolamento térmica e absorção sonora. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-graduação da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa PB, 2010.

OLIVEIRA, M. P.; BARBOSA, N. P.; TORRES, S. M.; LEAL, A. F.; SILVA, C. G. Compósitos à base de gesso com resíduos de EVA e Vermiculita. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande/PB, v.16, n.6, p.684–689, 2012.

OZISIK. Transferência de Calor, um texto básico. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S. A., 1990.

SOUZA, V. A. Estudo do comportamento de materiais não convencionais utilizados como revestimentos de parede, visando à redução da carga térmica. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-graduação da Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.

SZNELWAR, J. J.; SCALABRIN, R. Relatório Técnico: Perfil da Vermiculita. 2009.

TROVÃO, A. P. Pasta de gesso com incorporação de resíduo de gesso e aditivo retardador de pega. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Programa de Pós Graduação da Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.