

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

ISABELA CAROLINE RIBEIRO DA SILVA

**CARACTERIZAÇÃO E UTILIZAÇÃO DA VERMICULITA EXPANDIDA COMO
BARREIRA TÉRMICA**

BELO HORIZONTE

2016

ISABELA CAROLINE RIBEIRO DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO E UTILIZAÇÃO DA VERMICULITA EXPANDIDA COMO
BARREIRA TÉRMICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Paulo Renato Perdigão de Paiva

BELO HORIZONTE

2016

ISABELA CAROLINE RIBEIRO DA SILVA

CARACTERIZAÇÃO E UTILIZAÇÃO DA VERMICULITA EXPANDIDA COMO
BARREIRA TÉRMICA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no Curso de Graduação em Engenharia de Materiais do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 06/12/2016

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva – Orientador

Profª. Dra. Luciana Boaventura Palhares

Profª. Dra. Roberta Viana Ferreira

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à minha família que sempre torceu e acreditou em meu sucesso, me apoiou em todas as decisões difíceis e que sempre me deu todo o suporte necessário para a realização dos meus estudos.

Ao Prof. Dr. Paulo Renato Perdigão de Paiva, pela dedicação, paciência, apoio e orientação na elaboração deste trabalho, sem o qual, certamente não seria possível determinar os objetivos e atingir as metas propostas.

Aos meus amigos de faculdade, com os quais foi possível trocar experiências e que sempre estiveram dispostos a me ajudar nos momentos de dúvidas.

Aos demais professores do curso, por todo o conhecimento transmitido ao longo dos últimos anos.

Às professoras Dra. Luciana Boaventura Palhares e Dra. Roberta Viana Ferreira, por aceitarem fazer parte da banca examinadora e com seus conhecimentos contribuírem para este trabalho.

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 obrigada.

RESUMO

O conforto térmico é um dos itens mais importantes a serem considerados no projeto de uma edificação. Sendo assim, há uma exigência por novas técnicas de construção e novos materiais que atendam à essa demanda, e que ao mesmo tempo sejam ambientalmente e economicamente favoráveis. A utilização da vermiculita em argamassas é uma das técnicas que vem sendo utilizada com eficiência para o isolamento termoacústico de edificações, devido às propriedades excepcionais deste mineral quando em sua forma expandida. No entanto, a adição de qualquer material tem influência direta nas propriedades físicas e mecânicas, as quais precisam ser investigadas. Desta forma, este Trabalho de Conclusão de Curso teve como objetivo principal trazer uma análise sobre o mineral vermiculita, envolvendo um estudo de caracterização desse material, de sua capacidade de expansão sob diferentes temperaturas e influência do mesmo nas propriedades térmicas e mecânicas de argamassas de revestimento com sua adição. Para o cumprimento desse último objetivo, produziram-se corpos de prova com seis diferentes composições, dentre as quais três contendo vermiculita e as demais substituindo-se o teor de vermiculita por areia, para efeitos de comparação. As argamassas produzidas, após um período mínimo de vinte oito dias de cura fora do molde foram testadas mecanicamente à partir de um ensaio de compressão axial, enquanto as propriedades térmicas foram analisadas qualitativamente à partir de um ensaio onde buscou-se medir a variação de temperatura de uma placa fria, quando submetida à um fluxo de calor gerado por uma placa quente, e utilizando-se as argamassas produzidas como meio de propagação do calor. Os resultados dos testes de caracterização demonstraram em todos os casos características esperadas para a vermiculita, comprovando assim elevado grau de pureza do material utilizado. O ensaio térmico demonstrou que de forma geral a adição de vermiculita nas argamassas produzidas contribuiu efetivamente para um maior isolamento térmico. O ensaio mecânico, por sua vez, apontou que a incorporação de vermiculita promoveu uma diminuição da resistência à compressão das argamassas.

Palavras – chave: *vermiculita; isolamento; propriedades térmicas; propriedades mecânicas;*

ABSTRACT

Thermal comfort is one of the most important items to consider on building's design. Thus, there is a demand for new construction techniques and new materials that comply with this demand and at the same time are environmentally and economically favorable. The use of vermiculite in mortars is one of the techniques that has been used effectively for the thermo-acoustic insulation of buildings due to the exceptional properties of this mineral when in its expanded form. However, the addition of any material has a direct influence on physical and mechanical properties, and it needs to be investigated. In this way, the main objective of this work was to analyze the mineral vermiculite, involving a study of the characterization of this material, its capacity of expansion under different temperatures and its influence on the thermal and mechanical properties of mortars with its addition. For the accomplishment of this last objective, test specimens were produced with six different compositions, among them three containing vermiculite and the others replacing the vermiculite content by sand, for comparison purposes. The mortars produced, after a minimum of twenty eight days of curing outside the mold, were mechanically tested from an axial compression test, while the thermal properties were qualitatively analyzed on an experiment where the variation of temperature of a cold plate was measured, when it was subjected to a heat flow generated by a hot plate, and using the mortars produced as heat propagation medium. The results of the characterization tests demonstrated in all cases the characteristics already expected for vermiculite, proving a high degree of purity of the material used. The thermal and mechanical tests showed that, in general, the addition of vermiculite effectively contributed to a better thermal insulation of the mortars produced in this work, but promoted a decrease in the compressive strength of them.

Key – words: *vermiculite; insulation; thermal properties; mechanical properties;*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura cristalina do mineral vermiculita	14
Figura 2 – Grãos de Vermiculita	17
Figura 3 – Comparação de volume entre a vermiculita crua e expandida	17
Figura 4 – Variação da condutividade térmica em função da massa específica	31
Figura 5 – Esquema do método de placa quente protegida	33
Figura 6 – Esquemas de arranjo possíveis no método fluximétrico	35
Figura 7 – Esquema do método Flash	38
Figura 8 – Argamassas de revestimento	39
Figura 9 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho	42
Figura 10 – Ensaio de compressão uniaxial	46
Figura 11 – Esquema montado para avaliação da condutividade	47
Figura 12 – Morfologia da vermiculita em sua forma natural	49
Figura 13 – Morfologia para aquecimento a 700°C e (a) 5 minutos (b) 10 minutos	50
Figura 14 – Morfologia para aquecimento a 800°C e (a) 5 minutos (b) 10 minutos	51
Figura 15 – Morfologia para expansão a 900°C e (a) 5 min (b) 10 min	52
Figura 16 – Morfologia para expansão a 900°C (a) 10 min (b) trinca	53
Figura 17 – Difratoograma da vermiculita <i>in natura</i>	56
Figura 18- Difratoograma da vermiculita expandida (800°C - 10 min)	56
Figura 19 – Resultados da análise de DSC	58
Figura 20 – Corpos de prova produzidos para os testes	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química (%) das vermiculitas comerciais brasileiras	16
Tabela 2 – Principais depósitos brasileiros de vermiculita e suas reservas	21
Tabela 3 – Reservas e Produção Mundial de Vermiculita no ano de 2014	21
Tabela 4 – Classificação Granulométrica da Vermiculita	23
Tabela 5 – Traços para composição das argamassas produzidas	45
Tabela 6 – Massa específica aparente e rendimento volumétrico	54
Tabela 7 – Composição química da amostra de vermiculita natural	57
Tabela 8 – Composição química da vermiculita expandida (800°C - 10 min)	57
Tabela 9 – Ensaio de compressão uniaxial – Corpos de prova contendo vermiculita	60
Tabela 10 – Ensaio de compressão uniaxial – Corpos de prova contendo areia	60
Tabela 11 – Taxa de variação de temperatura - T placa quente = 50°C	61
Tabela 12 – Taxa de variação de temperatura - T placa quente = 100°C	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Contexto	11
1.2	Objetivos	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Vermiculita	14
2.1.1	<i>Mineralogia da Vermiculita</i>	14
2.1.2	<i>Expansão ou esfoliação da vermiculita</i>	17
2.1.3	<i>Características da vermiculita expandida</i>	19
2.1.3.1	<i>Baixa densidade</i>	19
2.1.3.2	<i>Baixa condutividade térmica</i>	19
2.1.3.3	<i>Baixa condutividade acústica</i>	19
2.1.3.4	<i>Elevada capacidade de troca iônica</i>	19
2.1.3.5	<i>Alta retenção de água</i>	19
2.1.3.6	<i>Incombustibilidade</i>	20
2.1.4	<i>Panorama mundial de reservas e produção de vermiculita</i>	20
2.1.5	<i>Extração e beneficiamento</i>	22
2.1.6	<i>Granulometria</i>	23
2.1.7	<i>Aplicações da vermiculita</i>	23
2.1.7.1	<i>Agricultura</i>	24
2.1.7.2	<i>Construção Civil</i>	24
2.1.7.3	<i>Indústria</i>	25
2.1.7.4	<i>Química</i>	25
2.1.7.5	<i>Siderurgia e Fundição</i>	25
2.1.7.6	<i>Ambiental</i>	26
2.2	Conforto Térmico	26
2.3	Mecanismos de Transferência de Calor	27
2.3.1	<i>Convecção</i>	27
2.3.2	<i>Radiação</i>	28
2.3.3	<i>Condução</i>	29
2.4	Propriedades Térmicas dos Materiais	30
2.5	Isolantes térmicos	32

2.6	Técnicas de Caracterização Térmica dos Materiais	33
2.6.1	Métodos em regime permanente	33
2.6.1.1	<i>Método da placa quente protegida</i>	33
2.6.1.2	<i>Método fluximétrico</i>	34
2.6.2	Métodos em regime transiente	36
2.6.2.1	<i>Método do fio quente</i>	36
2.6.2.2	<i>Sondas térmicas</i>	37
2.6.2.3	<i>Método Flash</i>	37
2.7	Argamassas	38
2.7.1	<i>Materiais das argamassas</i>	40
2.7.2	<i>Proporção de vermiculita utilizada em argamassas para isolamento</i>	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS	42
3.1	Matérias- primas	42
3.2	Metodologia experimental	43
3.2.1	<i>Estudo da expansão da vermiculita</i>	43
3.2.1.1	<i>Expansão em forno elétrico</i>	43
3.2.1.2	<i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i>	43
3.2.1.3	<i>Determinação da massa aparente e rendimento volumétrico</i>	43
3.2.2	<i>Caracterização da vermiculita</i>	44
3.2.2.1	<i>Difração de Raios X (DRX)</i>	44
3.2.2.2	<i>Fluorescência de Raios X (FRX)</i>	44
3.2.2.3	<i>Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC)</i>	45
3.2.3	<i>Determinação das formulações de referência</i>	45
3.2.4	<i>Fabricação dos corpos de prova</i>	45
3.2.5	<i>Propriedades mecânicas dos corpos de prova contendo vermiculita</i>	46
3.2.6	<i>Avaliação das propriedades térmicas</i>	47
3.2.6.1	<i>Análise qualitativa da condutividade térmica e resistividade térmica</i>	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1	Estudo da expansão da vermiculita	49
4.1.1	<i>Microscopia eletrônica de varredura (MEV)</i>	49
4.1.2	<i>Massa específica aparente e rendimento volumétrico</i>	54
4.2	Caracterização da vermiculita	55
4.2.1	<i>Difração de Raios X</i>	55
4.2.2	<i>Fluorescência de Raios X</i>	57

<i>4.2.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)</i>	58
4.3 Fabricação dos corpos de prova	58
<i>4.3.1 Ensaio de compressão</i>	59
4.4 Análise qualitativa das propriedades térmicas das argamassas produzidas	61
5 CONCLUSÕES	64
REFERÊNCIAS	66
APÊNDICE A: GRÁFICOS DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO TEMPO	71

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

A vermiculita é um mineral derivado da alteração de micas, com inúmeras aplicações na construção civil, indústria de manufaturados, agricultura, horticultura e meio ambiente. A vermiculita se enquadra ainda na categoria de materiais não convencionais, ou seja, materiais com proposta de inovação tecnológica, e que vem sendo desenvolvida em especial para a fabricação de isolantes térmicos, concreto leve e isolantes de som, painéis e divisórias, portais à prova de fogo, agricultura hidropônica, condicionador de solos, fertilizantes, pesticidas, e absorvedores de óleo, graxas e metais pesados (REIS, 2002).

O conforto térmico é uma das maiores preocupações no projeto de edificações, principalmente em locais que sofrem com variações extremas de temperatura ao longo do ano. Como os sistemas de aquecimento e resfriamento são um dos maiores consumidores de energia nestes locais, a busca por materiais com máxima eficiência em termos de isolamento se faz imprescindível. Dessa forma, a vermiculita surge como alternativa à tal aplicação, e já vem sendo empregada com eficiência na fabricação de produtos acabados (placas, painéis, tijolos, entre outros), como também na forma de produtos monolíticos, como as argamassas e enchimentos (PESSATTO, 2005).

Devido à essas características, buscou-se neste Trabalho de Conclusão de Curso realizar a caracterização tecnológica da vermiculita, para aprofundamento dos conhecimentos acerca desse mineral, a qual contou com os ensaios de Difração de Raios X (DRX), Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC), Fluorescência de Raios X (FRX) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

Neste trabalho desenvolveram-se também placas de revestimento contendo vermiculita expandida com a finalidade de isolamento térmico para paredes, pisos e lajes. A utilização desse mineral para esse fim justifica-se principalmente pelas características adquiridas pelo mesmo quando sofre um processo de aquecimento brusco na faixa de 700-1000°C, chamado de esfoliação ou expansão, no qual seu volume final pode alcançar de 10 à 30 vezes o volume do material em sua forma natural (BORGES, 2009).

Na forma expandida, a vermiculita apresenta baixa condutividade térmica, tornando-se um excelente isolante, mas também passa a apresentar propriedades interessantes para aplicação em edificações, como a baixa densidade, o que reduz o peso estrutural, a

incombustibilidade, e a alta capacidade de retenção líquida (CINTRA, 2013; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2009).

A influência da temperatura sob a taxa de expansão da vermiculita foi analisada, realizando-se um estudo do processo de esfoliação sob as temperaturas de 700, 800 e 900°C, e verificando-se o nível de expansão obtido, assim como a morfologia do mineral esfoliado. Com isso, chegou-se à conclusão de que a temperatura de esfoliação a ser utilizada nesse trabalho seria de 800°C, e a partir daí mediu-se a massa específica aparente e o rendimento volumétrico da expansão para a amostra a essa temperatura.

A verificação do potencial da vermiculita como agente isolante térmico em argamassas no estado endurecido, assim como a alteração das propriedades mecânicas das mesmas pela incorporação desse agregado realizou-se através de um ensaio térmico e um mecânico. Para a caracterização térmica fez-se uma análise qualitativa da condutividade térmica e resistividade térmica das argamassas, medindo-se a variação de temperatura no tempo de uma placa fria, que foi separada fisicamente de uma fonte de calor pelas argamassas produzidas. Quanto à caracterização mecânica, realizou-se o ensaio de resistência à compressão axial.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar as características físicas e químicas da vermiculita na forma expandida e a influência deste material nas propriedades de placas produzidas com a finalidade de isolamento térmico.

Como objetivos específicos podem-se listar:

- Avaliação da influência da temperatura sob a taxa de expansão da vermiculita.
- Desenvolvimento de placas para revestimento que apresentem propriedades isolantes satisfatórias.
- Análise da influência da formulação sob as características térmico-isolantes das placas produzidas e sob as propriedades mecânicas das mesmas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Vermiculita

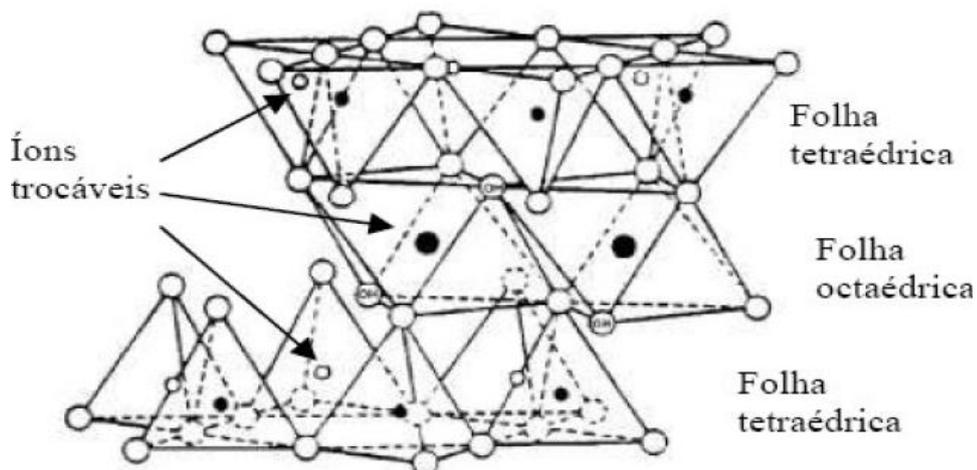
A vermiculita foi descoberta em 1824 no estado de Massachusetts, Estados Unidos por Thomas H. Webb (CINTRA, 2013; SILVEIRA, 2005). Seu nome é originário do latim *vermiculus*, que significa pequeno verme, e se deve ao fato de que quando em expansão sob aquecimento, as partículas deste mineral movimentam-se de maneira semelhante a vermes (GRIM, 1968; UGARTE et al., 2008).

2.1.1 Mineralogia da Vermiculita

O mineral vermiculita é um aluminossilicato hidratado constituído principalmente por ferro, magnésio e alumínio, pertencente à família das micas (CINTRA, 2013; UGARTE *et al.*, 2008; CURBELO, 2002).

De acordo com Cintra (2013), Nascimento (2008) e Ugarte *et al.* (2008) a estrutura cristalina lamelar da vermiculita é formada pela célula unitária do grupo argilomineral 2:1, que contém uma camada octaédrica $[Mg_3(OH)_6]$ aprisionada entre duas camadas tetraédricas de SiO_4 , como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura cristalina do mineral vermiculita



Fonte: GOMES, 2007.

Este mineral ocorre em placas constituídas por finíssimas lamínulas superpostas com espessuras em torno de 9,3 Å (VALDIVIEZO e SOUZA, 2010). As lamelas são separadas por uma camada de água, a qual ocupa um espaço definido de 4,98Å (NASCIMENTO, 2008). A

rede de hidratação consiste em duas folhas de moléculas de água que se arranjam numa coordenação octaédrica com cátions principalmente de magnésio (SILVEIRA, 2005).

De acordo com Nunes (2014), uma representação geral da célula unitária do mineral pode ser expressa pela fórmula: $(\text{Mg}, \text{Fe})_3[(\text{Si}, \text{Al})_4 \text{O}_{10}] [\text{OH}]_2 4\text{H}_2\text{O}$.

Os grupos tetraédricos e octaédricos têm seus vértices compostos por átomos ou íons oxigênio e íons hidroxila, que formam ligações covalentes, unindo os planos e trazendo estabilidade a estrutura (UGARTE *et al.*, 2008).

O material apresenta grande capacidade de troca catiônica, devido às cargas não balanceadas de 1,0 a 1,5 por célula unitária (NASCIMENTO, 2008). O desbalanceamento ocorre principalmente com a substituição de Si^{4+} por Al^{3+} nas camadas tetraédricas. Tais substituições podem ser compensadas por outras substituições na estrutura cristalina, mas persiste a deficiência de cargas. Para que seja então mantida a eletroneutralidade, a compensação deve ser feita por cátions que se localizam entre as camadas estruturais, que são cátions trocáveis (CINTRA, 2013; NASCIMENTO 2008).

O íon Mg^{2+} atua como cátion trocável que ocupa as posições octaédricas e que pode ser substituído por Fe^{3+} , Fe^{2+} , e Al^{3+} (LIMA, 2008). Todas as posições da camada octaédrica podem ser preenchidas (forma trioctaédricas) ou somente dois terços delas podem estar preenchidas (formas dioctaédricas) (MUÑOZ E CASTELLÓ, 2003; AGUIAR E NOVAES, 2002 apud UGARTE *et al.*, 2008).

De acordo com Nunes (2014), Lima (2008) e Nascimento (2008) até alguns anos atrás, o termo vermiculita era muito mal utilizado, sendo aplicado a todo mineral micáceo-lamelar que fosse capaz de expandir ou esfoliar quando aquecido. Através de estudos químicos e de difração de raios X, foi demonstrado que muitos minerais até então classificados como vermiculitas eram, na verdade, camadas interstratificadas de mica-vermiculita e clorita-vermiculita.

Interstratificações ternárias e quaternárias de vermiculita com illita, clorita e /ou montmorilonita também podem ocorrer (WEISS e ROWLAND, 1956). Além disso, também existe mistura lateral de vermiculita e clorita dentro da mesma camada estrutural. Sendo assim, dentro de uma mesma jazida há uma grande variabilidade na estrutura cristalina, o que torna a caracterização mineralógica complicada.

A vermiculita é um mineral rico em óxidos, principalmente de silício e magnésio. A composição química básica de três tipos de vermiculitas comerciais brasileiras é mostrada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química (%) das vermiculitas comerciais brasileiras

Composto	Santa Luzia (PB)	Sancrelândia (GO)	Massapê (PI)
SiO ₂	42,8	40,4	45,10
MgO	19,9	18,3	23,60
Al ₂ O ₃	6,8	13,0	10,20
Fe ₂ O ₃	6,7	8,5	5,80
K ₂ O	4,6	3,7	0,50
Na ₂ O	1,00	2,5	0,10
CaO	0,56	1,4	3,60
MnO	0,11	0,12	-
TiO ₂	0,86	1,0	0,70
NiO	0,29	0,21	-
BaO	-	-	0,20
Cr ₂ O ₃	0,45	0,31	-
H ₂ O (total)	15,80	10,40	10,20
Total	99,87	100,00	100,00

Fonte: UGARTE et al, 2004.

A vermiculita pode resultar da alteração gerada por intemperismo de uma mica, mais comumente a biotita ou flogopita (VALDIVIEZO e SOUZA, 2010). Outros minerais comumente associados à vermiculita são: a biotita, hidrobiotita, piroxenita, apatita, anfibólio, sienito, serpentinito, flogopita, diopsídio, clorita, amianto, talco e minerais argilosos (DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL - DNMP, 2015; UGARTE *et al.*, 2008).

A alteração supergênica deu-se pela circulação de água, que removeu álcalis, redistribuiu o magnésio e acrescentou água, a qual foi intercalada nas camadas intercrystalinas, para formar vermiculita (CASTRO, 1996 apud VALDIVIEZO e SOUZA, 2010).

De acordo com Ugarte *et al.* (2008), a vermiculita apresenta as mesmas propriedades físicas da mica, no que se refere à clivagem típica, separando-se em finas lamelas flexíveis, porém sem elasticidade. Já as suas cores variam do bronze ao amarelo-amarronzado, com brilho perolado típico, como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Grãos de Vermiculita



Fonte: BEUTHER, 2015.

De acordo com Valdiviezo e Souza (2010), a principal característica que a diferencia de outras micas, como a moscovita, é que quando as placas de vermiculita são submetidas a temperaturas acima de 900°C, a água de hidratação contida entre suas lâminas se transforma em vapor, expulsando-a de modo irreversível, constituindo flocos.

2.1.2 Expansão ou esfoliação da vermiculita

De acordo com Silveira (2005), a vermiculita quando aquecida lentamente, passa por um processo de desidratação que culmina na contração de sua estrutura. No entanto, quando a perda de moléculas de água ocorre de forma rápida, como num processo de aquecimento brusco em temperaturas entre 800-1000°C, a vermiculita pode sofrer o processo de esfoliação, ou expansão (BORGES, 2009; SILVEIRA, 2005). A Figura 3 ilustra o resultado da expansão sobre a vermiculita.

Figura 3 – Comparação de volume entre a vermiculita crua e expandida



Fonte: ARAÚJO, 2009

Na esfoliação, o vapor de água formado com o aquecimento sai de forma brusca e irreversível, exercendo então uma pressão sob as lamelas, provocando seu distanciamento e expansão abrupta na direção axial, com a qual o volume final da vermiculita pode alcançar até 30 vezes de seu tamanho inicial (BORGES, 2009; LUZ *et al.*, 2001 apud SILVEIRA, 2005; GRIM, 1968).

Segundo Silveira (2005) e Ugarte *et al.* (2008), quando a retirada de água é feita até 150°C, a mesma é reversível, e não ocorre esfoliação, pois remove-se apenas a água responsável pela umidade, podendo a vermiculita reabsorver água à partir do meio ambiente, sem prejuízo às propriedades piroexpansíveis. Na faixa de temperatura que vai desde 150 até 250°C, elimina-se a água quimicamente ligada à vermiculita. Em temperaturas à partir de 800°C, a água retirada da vermiculita é proveniente dos grupos hidroxila, de forma irreversível, o que contribui para as alterações físicas e mecânicas observadas na vermiculita expandida (UGARTE *et al.*, 2008; SANTOS, 1975).

De acordo com Barshad (1948 apud SILVEIRA, 2005) se a vermiculita é aquecida gradualmente até uma temperatura de 300°C e posteriormente sofre um aquecimento brusco, na faixa de temperatura citada anteriormente, a mesma não apresenta mais a propriedade de expansão macroscópica. Isso se deve ao fato de que as moléculas de água que deveriam se transformar em vapor e gerar a pressão sob as lâminas do mineral já foram eliminadas durante o aquecimento gradual.

De acordo com Ugarte *et al.* (2008), a vermiculita pura teoricamente poderia se expandir até 30 ou 40 vezes o seu volume original, no entanto, a vermiculita comercializada na forma natural expande, em média, de 8 a 12 vezes. Uma possível explicação para isso pode ser a presença de impurezas, assim como as características físico-químicas, principalmente a quantidade de moléculas de água livre ligadas à estrutura cristalina (UGARTE *et al.*, 2004; MARTINS *et al.*, 2001).

A maior parte da esfoliação da vermiculita nos EUA e no Brasil ocorre em fornos verticais, onde o material passa rapidamente por uma zona com temperaturas de cerca de 900°C e se acumula na base, onde a esfoliação continua. A temperatura e tempo de residência na zona quente vão determinar a densidade e aparência da vermiculita expandida, e a natureza oxidante ou redutiva da chama. Em alguns países, é utilizado um forno de tambor rotativo. É utilizado também o reator Torbed, que se mostra eficiente para concentrados que requerem maior tempo de residência ou temperaturas mais elevadas. No Brasil, utiliza-se tanto o forno vertical como o forno rotativo. (MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA- MME, 2009).

2.1.3 Características da vermiculita expandida

Quando em seu estado natural a vermiculita apresenta características pouco interessantes para aplicação, porém, em seu estado expandido, a mesma apresenta diversas características interessantes à diversos setores citados abaixo.

2.1.3.1 Baixa densidade

A densidade da vermiculita expandida, sem compactação, deve estar entre 70 – 140 kg/m³ (CINTRA,2013). A densidade depende da granulometria do produto, da temperatura e tempo de residência na zona de aquecimento, e ainda da natureza oxidante ou redutora do ambiente de aquecimento, que é função do combustível utilizado (UGARTE *et al.*, 2008).

2.1.3.2 Baixa condutividade térmica

Devido a quantidade de espaços preenchidos por ar, entre as lamelas, após a expansão, o material apresenta alta porosidade, o que permite à vermiculita uma baixa condutividade, cerca de 0,06 kcal m/m² °C, a 25 °C, o que permite sua utilização como isolante térmico (REFRÁTIL, 2016; CINTRA, 2013).

2.1.3.3 Baixa condutividade acústica

A vermiculita expandida quando usada em argamassas e concretos tem demonstrado uma capacidade de redução de ruídos de até 62% (REFRÁTIL, 2016).

2.1.3.4 Elevada capacidade de troca iônica

As características químicas e estruturais da vermiculita permitem uma elevada capacidade de troca iônica, que se torna importante principalmente importante nas aplicações da vermiculita na agricultura, pois ela é utilizada como veículo não só de nutrientes orgânicos, como também, como portador de defensivos agrícolas (MME, 2009).

2.1.3.5 Alta retenção de água

A vermiculita pode reter grande quantidade de água, chegando a até 5 vezes o seu próprio volume, devido à sua alta porosidade (CINTRA, 2013).

2.1.3.6 *Incombustibilidade*

A vermiculita não possui componentes orgânicos nem outros produtos combustíveis, podendo suportar temperaturas de até 1.100 °C sem sofrer alterações na sua estrutura. Sua sinterização ocorre a partir dos 1150 °C (MME, 2009).

2.1.4 *Panorama mundial de reservas e produção de vermiculita*

A exploração de vermiculita no Brasil começou na década de 50 em São Paulo, e veio a atingir uma maior expressão à partir de 1971 com a entrada em operação da mina de São Luiz de Montes Belos (GO) (MME, 2009).

Os depósitos brasileiros e mundiais de vermiculita ocorrem principalmente dentro das zonas de complexos máficos, ultramáficos e carbonatitos (UGARTE *et al.*,2008). Exemplo disso são as duas maiores reservas do mundo, encontradas em Libby, Estados Unidos com depósitos metamórficos máficos/ultramáficos e Palabora na África do Sul, com depósito carbonatito (REIS, 2002).

Os depósitos brasileiros de vermiculita conhecidos são divididos em dois tipos (FRAGA, 2010): i) os derivados de alteração da mica flogopita em carbonatitos; ii) os derivados de alteração da biotita em complexos metamórficos máfico-ultramáficos serpentinizados;

De acordo com o DNPM (2015) o Brasil detém 10% das reservas mundiais de vermiculita, ocupando a terceira posição no cenário mundial. As reservas nacionais se concentram em cinco estados. Goiás ocupa a primeira posição com 66,7%, seguido pela Paraíba (19,1%), Bahia (13,3%), Piauí (0,9%) e Pernambuco (0,05%).

Em virtude da ausência de normas brasileiras para cálculos de reserva minerais, que sejam reconhecidas internacionalmente, a maior parte dos depósitos de vermiculita conhecida no país só pode ser classificada como recurso e, talvez 20%, como reserva desse mineral industrial (REIS, 2002). Na Tabela 2r, constam os principais tipos de depósitos de vermiculita identificados no Brasil e suas reservas.

No ano de 2014, o maior produtor de vermiculita foi a África do Sul, com 32% da produção, seguida pelos Estados Unidos da América, com 24,6%, Brasil, com 13,9% e a China, com 12,3%. Observa-se que os quatro maiores produtores concentraram 82,8% da produção mundial, enquanto que somente os dois maiores produtores (África do Sul e Estados Unidos da América) representaram pouco mais da metade da produção mundial (DNPM,

2015). Na Tabela 3 constam os dados de reservas e produção mundial de vermiculita no ano de 2014.

Tabela 2 – Principais depósitos brasileiros de vermiculita e suas reservas

Depósito	Tipo	Tonelagem e Teor de vermiculita (%)
Catalão I (GO)	Carbonatito	10 Mt e 20%
Queimada Nova (PI)	Máfico e ultramáfico	1.95Mt e 20%
Santa Luzia (PB)	Máfico e ultramáfico	>7Mt e 30%
Sancrelândia (GO)	Máfico e ultramáfico	1.5Mt e 30%
Montes Belos (GO)	Máfico e ultramáfico	2Mt e 30%
Brumado (BA)	Máfico e ultramáfico	2Mt e 25%

Fonte: REIS, 2002.

Tabela 3 – Reservas e Produção Mundial de Vermiculita no ano de 2014

País	Reservas (10³t)	Produção (t)
África do Sul	14.000	130.000
Brasil	6.287	56.444
Bulgária	-	20.000
China	-	50.000
Estados Unidos	25.000	100.000
Índia	1.700	15.000
Rússia	-	25.000
Outros países	15.000	10.000
Total	61.987	406.444

Fonte: MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2015 apud DNPM, 2015.

2.1.5 Extração e beneficiamento

De acordo com UGARTE *et al.* (2008) nos depósitos de vermiculita é comum encontrar-se este mineral nas formas de mica parcialmente alterada em vermiculita, vermiculita alterando para caulinita e vermiculita associada aos minerais de ganga, o que gera efeitos significativos nos métodos de lavra e processamento.

A vermiculita é normalmente minerada em por um processo de lavra a céu aberto, (CINTRA, 2013; OLIVEIRA, 2009; UGARTE *et al.*, 2008). São utilizados equipamentos mecânicos convencionais, como trator de esteiras, escavadeiras, carregadeiras e caminhões.

De acordo com Nascimento (2008) é desejável lavar a vermiculita com teor bem elevado (em torno de 80%), devido aos custos devido aos custos de exploração, beneficiamento e transporte, mas mesmo assim os minerais com que apresentam baixo teor (20-30%) ainda podem ser aproveitados economicamente.

Em contraste com outros minérios, o valor do minério de vermiculita depende da distribuição e eficiência de aproveitamento das partículas maiores, o que exige métodos de mineração com capacidade crescente de obtenção da vermiculita com tal característica (UGARTE *et al.*, 2008; NASCIMENTO, 2008).

As técnicas de beneficiamento são baseadas em propriedades como forma, densidade, composição e resistência à cominuição (MME, 2009). Dois tipos de processo de beneficiamento são utilizados, o processo a seco e a úmido.

No Brasil, a técnica mais utilizada é o processo de beneficiamento a seco, que requer uma etapa de secagem antes da separação. Nela, o minério lavrado é colocado ao sol para secagem até uma umidade de 4%. Feito isso, o mineral é então alimentado no processo, que se baseia em moagem em moinhos de martelo, e peneiramento, para obtenção de concentrados com diferentes frações granulométricas (OLIVEIRA, 2009).

A fração fina é descartada e o restante é classificado por meio de separadores pneumáticos, que tem maior seletividade, permitindo obtenção de faixas granulométricas mais estreitas, ou também por mesas vibratórias. Pode-se ainda utilizar de técnicas de separação magnéticas e eletrostáticas em alguns casos, como quando há presença de biotita do minério (MME, 2009).

De acordo com Ugarte *et al.* (2008), o beneficiamento a úmido, com menor aplicação, é usado quando o teor de vermiculita no minério bruto é baixo, ou há a presença de contaminantes. Nele a concentração é feita por flotação, após peneiramento e deslamagem.

Apesar da comercialização da vermiculita na sua forma natural, a sua utilização se faz, em sua maioria, na forma expandida. Para tanto a vermiculita é transportada até a unidade produtora de vermiculita expandida, como concentrado em “big-bags” de propileno retornáveis, com capacidade de até uma tonelada, que facilitam a estocagem, separação por granulometria e carregamento dos fornos para a esfoliação (CASTRO, 2002 apud CINTRA 2013).

2.1.6 Granulometria

A vermiculita é classificada de acordo com sua granulometria, podendo ser grossa, média, fina, superfina e micron. A Tabela 4 mostra apresenta a classificação de acordo o padrão internacional, americano e brasileiro.

Tabela 4 – Classificação Granulométrica da Vermiculita

Padrão Internacional		Padrão Americano		Padrão Brasileiro	
Classificação	Tamanho (mm)	Classif.	Tamanho (mm)	Classificação	Tamanho (mm)
Grossa	-8,0 a +2,8	1	-7,0 a +3,327	-	-
Média	-4,0 a +1,4	2	-3,5 a +1,75	Média	55-95% > 2,4
Fina	-2,0 a +0,71	3	-2,0 a +0,6	Fina	65-95% > 1,2
Superfina	-1,0 a +0,355	4	-0,85 a +0,212	Superfina	70-95% > 0,6
Micron	-0,71 a +0,25	5	-0,3	Micron	80-100% > 0,3

Fonte: REIS, 2002.

2.1.7 Aplicações da vermiculita

A vermiculita pode ser aplicada tanto na forma natural quanto na forma expandida em diversas aplicações. Em geral, a aplicação da vermiculita em cada uso específico depende da sua granulometria e pureza. Aquelas com granulometria mais fina são mais aplicadas no ramo de construção civil, ou também na produção de fertilizantes e de alimentos para animais. Já as de granulometria mais grosseira são utilizadas para fins de horticultura, cultivo e germinação de sementes, dentre outros (UGARTE *et al.*, 2008).

2.1.7.1 Agricultura

A vermiculita é utilizada em substratos para criação de mudas em estufas, pois permite o crescimento rápido e arejado das raízes, economizando irrigação, portando nutrientes e água, facilitando o transporte das mudas para o campo em razão de seu baixo peso e protegendo as raízes no replantio (MME, 2009).

Além disso, ainda é usada como componente na fabricação de substratos orgânicos e fertilizantes organominerais, como condicionador de solos argilosos ou de baixa permeabilidade, na retenção de água em solos arenosos, inibidor de lixiviação de micro e macro nutrientes de adubos, como agente anti-adensante em campos gramados e carga na fabricação de defensivos agrícolas, no enchimento de vasos de floricultura e de uso doméstico e na criação de frutas e hortaliças hidropônicas (REFRÁTIL, 2016; MME, 2009; UGARTE *et al.*, 2008; REIS, 2002).

2.1.7.2 Construção Civil

De acordo com UGARTE *et al.*, 2008, dentre os principais usos na construção civil, está a sua aplicação como isolante térmico e acústico em paredes, na forma de massa para revestimento, devido à sua baixa condutividade térmica e pequena propagação sonora. Neste segmento industrial, a vermiculita é usada nas granulometrias média, fina e superfina.

No setor da construção civil, a vermiculita é também usada na fabricação de concretos leves, que é o termo empregado por alguns autores para descrever uma argamassa com agregados leves, como a vermiculita, e utilizada como contra pisos ou enchimento de lajes metálicas para diminuição de carga nas estruturas convencionais (CASTRO, 2012 apud CINTRA, 2013; MME, 2009; REIS, 2002).

Outra aplicação é na composição de argamassas asfálticas anti-vibratórias e acústicas para recobrimento de assoalhos, argamassas acústicas e decorativas fabricadas com mistura de gesso e vermiculita (MME, 2009).

Devido à sua incombustibilidade, a vermiculita ainda é usada na composição de argamassas projetáveis para revestimento anti-fogo de estruturas metálicas, escadas de incêndio ou estruturas de suporte de equipamentos e como componente de divisórias retardantes ao fogo e proteção térmica de impermeabilizantes em lajes expostas ao tempo (REFRÁTIL, 2016; MME, 2009). De acordo com Reis (2002), há moldes de proteção de estruturas metálicas fabricados retardando fogo por até 240 minutos.

A vermiculita também é aplicada em fossos para piscinas de vinil, e saunas como camada de apoio e amortecimento (MME, 2009). Nessas aplicações ela tem outras vantagens, como boa trabalhabilidade e a baixa abrasividade, que desgasta menos o vinil, aumentando sua vida útil (REFRÁTIL, 2016).

2.1.7.3 Indústria

Na indústria a vermiculita é usada como isolante térmico em equipamentos aquecidos, tais como fornos, muflas, estufas, tanques, caldeiras, reatores e turbinas. Também é usada como isolante térmico na indústria do cimento, vidro, petroquímica, papel e celulose (MME, 2009).

De acordo com Reis (2002), a vermiculita pode ser usada na indústria naval, como proteção anti-fogo e isolante termoacústico.

A vermiculita também tem sido usada na fabricação de câmaras frias (CINTRA, 2013; REIS, 2002). De acordo com Cintra (2013), seu uso como isolante em câmaras frigoríficas é bastante difundido em vários países, especialmente nos da Europa.

Ugarte *et al.* (2008) afirma que na forma fina (abaixo de 40 mm), a vermiculita é muito utilizada como carga na indústria de tintas, fabricação de pneus e pastilhas de freio para a indústria automobilística.

De acordo com o MME (2009), Ugarte *et al.* (2008) e Reis (2002), outras aplicações da vermiculita na indústria são: fabricação de materiais refratários, na formulação de fibra de vidro cobertura de tanques de galvanoplastia para reduzir perdas de calor, carga na fabricação de certo tipos de polímeros e lubrificante de junções de trilhos durante ajuste térmico.

2.1.7.4 Química

Na química, a vermiculita é usada na elaboração de formulações químicas organominerais devido a sua elevada capacidade de troca catiônica e de absorção de água. Também pode ser usada como substituição de asbestos, como controladora e reguladora da densidade e em misturas com resinas (REIS, 2002).

2.1.7.5 Siderurgia e Fundição

Os concentrados de vermiculita são empregados como cobertura de metais líquidos na siderurgia e fundição, pois devido ao calor liberado por esses metais no estado líquido, a

vermiculita expande e atua como camada isolante, evitando perdas térmicas. A vermiculita é recomendada especialmente para aços com baixo conteúdo de carbono (REFRÁTIL, 2016).

2.1.7.6 Ambiental

De acordo com Cintra (2013) e o MME (2009) uma aplicação ambiental importante da vermiculita é como agente hidrofóbico como coletor de hidrocarboneto em meio aquoso, sendo usada como absorvente em derrames de óleo no mar, principalmente com o crescimento do segmento de extração de petróleo no Brasil. Além disso, também tem sido utilizada como agente de tratamento de águas poluídas.

2.2 Conforto Térmico

No projeto de uma edificação, a preocupação com o conforto térmico deve ser um item obrigatório. Alguns conceitos são importantes para entender essa questão, entre eles: conforto, desempenho e comportamento térmico.

A ASHRAE- 55 (2004) define o conforto térmico como sendo um estado de espírito que reflete a satisfação com o ambiente térmico que envolve a pessoa. Assim, as definições dos limitantes superior e inferior do conforto térmico são subjetivas, uma vez que envolve variáveis fisiológicas e psicológicas (VECCHIA, 2003 apud CINTRA, 2013).

No caso do desempenho térmico, sua medição é baseada em um padrão de referência, comparativo a outras situações definidas ou analisadas.

O comportamento térmico por sua vez é baseado em uma análise da resposta térmica, em função de algumas variáveis como tempo de exposição, excitações do clima, ambiente ou material e condições de utilização (CINTRA, 2013).

As principais características do ambiente interno que devem ser consideradas para avaliar o conforto térmico de uma edificação são: período de ocupação, número de ocupantes, atividades típicas desenvolvidas pelos ocupantes, os equipamentos usados e os materiais utilizados em sua construção (NOGUEIRA e NOGUEIRA, 2003; SANTOS, 2002 apud SOUSA, 2012).

A chave para manter uma temperatura confortável num edifício é a redução das perdas de calor para fora do mesmo no inverno e a redução de absorção de calor no verão. Para alcançar esse nível de conforto, em alguns países com variações climáticas extremas principalmente, são utilizados sistemas de aquecimento e resfriamento, que são grandes consumidores de energia.

De acordo com Al – Homoud (2005), nos Estados Unidos, por exemplo, estes sistemas correspondem de 50-70% do uso de energia em um edifício. Dessa forma, o desenvolvimento de materiais para o isolamento térmico é um fator de extrema importância para o conforto térmico e economia de energia.

2.3 Mecanismos de Transferência de Calor

Sempre que há um gradiente de temperatura no interior de um sistema ou o contato de dois sistemas com temperaturas distintas há um processo de transferência de energia. O processo através do qual a energia é transferida é conhecido como transferência de calor, onde o sistema de maior temperatura perde calor e diminui sua temperatura, e o mais frio recebe calor, aumentando sua temperatura, até que as temperaturas se igualem, alcançando-se o equilíbrio térmico.

A transferência de calor é estudada considerando-se três mecanismos de transporte de calor: convecção, radiação e condução.

2.3.1 Convecção

A convecção é um processo de transmissão de calor entre um fluido e um corpo sólido em que as moléculas se deslocam daquele com maior temperatura para o outro com temperatura mais baixa (COUTINHO, 2005 apud SOUSA, 2012).

A transmissão de calor por convecção é classificada em convecção natural e convecção forçada. Quando o movimento do fluido ocorre como resultado das diferenças de densidades causadas pelos gradientes de temperatura, falamos de convecção natural. Quando o movimento de mistura é induzido por algum agente externo, tal como uma bomba ou um ventilador, o processo é chamado de convecção forçada (CINTRA, 2013; CARLETTO, 2005).

De acordo com Halliday e Resnick (2012), na convecção quando um fluido entra em contato com um objeto com temperatura maior que a sua, a temperatura da parte do fluido que está em contato com o objeto quente aumenta e se expande, ficando menos densa. Como o fluido expandido tem densidade menor que o fluido restante que o cerca, de menor temperatura, a força de empuxo o faz subir. O fluido de menor temperatura passa então a ocupar o espaço antes preenchido pelo fluido que subiu, se aquecendo e assim repetindo-se o processo.

Na convecção há também o transporte mecânico de massa, portanto não está concorda completamente com a definição de transferência de calor. No entanto, como a convecção também efetua a transmissão de energia de regiões de maior temperatura para as de menor, o termo transmissão de calor por convecção tornou-se aceitável. (KREITH, 1973).

A grandeza física que caracteriza este modelo de transferência de calor é o coeficiente de transferência por convecção (h). Com ele, torna-se possível calcular o fluxo de calor transferido por convecção, dado pela Equação 1 (CINTRA, 2013):

$$Q_{cv} = h A (T_s - T_f) \quad (1)$$

Onde:

Q_{cv} = fluxo de calor transmitido por convecção (W/m²)

h = coeficiente de transferência por convecção (W/m.K)

A = área de contato entre o corpo e o fluido (m²)

T_s = temperatura da superfície

T_f = temperatura do fluido

De acordo com Coutinho (2005) apud Sousa (2012), o coeficiente de convecção depende da geometria, rugosidade e posição da superfície sólida, das propriedades termofísicas e ainda da velocidade do fluido.

2.3.2 *Radiação*

A radiação é um tipo de transferência de calor através de ondas eletromagnéticas, muitas vezes chamadas de radiação térmica (HALLIDAY e RESNICK, 2012). Não existe a necessidade de um meio material para que a energia seja transferida por radiação, por isso como exemplo, a Terra recebe a energia proveniente do Sol, que viaja pelo vácuo.

Todo objeto com temperatura acima de zero absoluto irradia energia. A energia emitida se distribui uniformemente em todas direções, assim as trocas de calor variam de acordo com a distância e posição de uma superfície em relação a outra (ÇENGEL, 2007 apud SOUSA, 2012). O fluxo de calor trocado por radiação em corpos porosos é dado pela Equação 2, que é uma modificação da Lei de Steffan- Boltzmann (CINTRA, 2013):

$$Q_{rd} = (1/\mu) \cdot 4 \cdot g \cdot d \cdot n^2 \cdot \sigma \cdot \epsilon \cdot T_s^3 \quad (2)$$

Onde:

Q_{rd} = fluxo de calor transmitido por radiação (W/m²)

μ = coeficiente de absorção de radiação do meio

g = fator geométrico que depende do formato dos poros

d = diâmetro médio dos poros (m)

n = índice de refração do material

σ = constante de Steffan Boltzmann (W/m².K⁴)

ε = emissividade do poro

T_s = temperatura absoluta da superfície (K)

2.3.3 Condução

Na transmissão de calor por condução, o calor passa de uma parte a outra de um mesmo corpo, ou de um corpo a outro em contato físico com ele, sem que haja transporte de matéria (BARROSO- KRAUSE, 2011 apud CINTRA, 2013; CARLETTO, 2005).

Em um corpo sólido, os átomos se acham em posições de equilíbrio determinadas pelo retículo cristalino, ao redor das quais eles podem oscilar. Quanto maior a temperatura do sólido em um dado local, maiores são as vibrações dos átomos ali. Essas vibrações, assim como a energia associada à elas irá se propagar então de átomo para átomo através de colisões, até que seja atingido um equilíbrio (HALLIDAY e RESNICK, 2012; CARLETTO, 2005).

A condução depende da natureza de cada material em transmitir calor. A condução ocorre predominantemente através de corpos sólidos, podendo também ocorrer através de fluidos, porém dificilmente não vem acompanhada de convecção (SOUSA, 2012; CARLETTO, 2005).

Para a análise do fluxo de calor por condução é usada a Lei de Fourier, mostrada na Equação 3:

$$Q_c = -k.A.\frac{dT}{dx} \quad (3)$$

Onde:

k = condutividade térmica (W/m.K)

A = área da superfície transversal ao fluxo de calor (m²)

$\frac{dT}{dx}$ = gradiente de temperatura (K/m²)

2.4 Propriedades Térmicas dos Materiais

A condutividade térmica k é uma medida da quantidade de calor que atravessa perpendicularmente uma superfície de área unitária por um determinado período de tempo (CINTRA, 2013).

De acordo com a ASTM Standard C 168 (1997) ela ainda pode ser definida como o fluxo de calor, que no regime estacionário e induzido por unidade de 1K de temperatura, atravessa um material homogêneo de espessura de 1 metro em uma direção perpendicular aos planos isotérmicos, durante um determinado período de tempo. Essa propriedade é expressa em W/m.K ou ainda kcal/m.h.K.

A condutividade térmica dos materiais depende de alguns fatores, como seu estado físico, natureza, composição, temperatura, massa específica, umidade e homogeneidade (CARLETTO, 2005).

De acordo com Sousa (2012), a variação de acordo com a temperatura é em muitos casos bem baixa, podendo ser desconsiderada para fins práticos, usando-se nestes casos um valor médio e adotando-a como uma constante. Quanto a umidade, nos corpos higroscópicos a condutividade térmica cresce com a elevação nos níveis de umidade (CARLETTO, 2005).

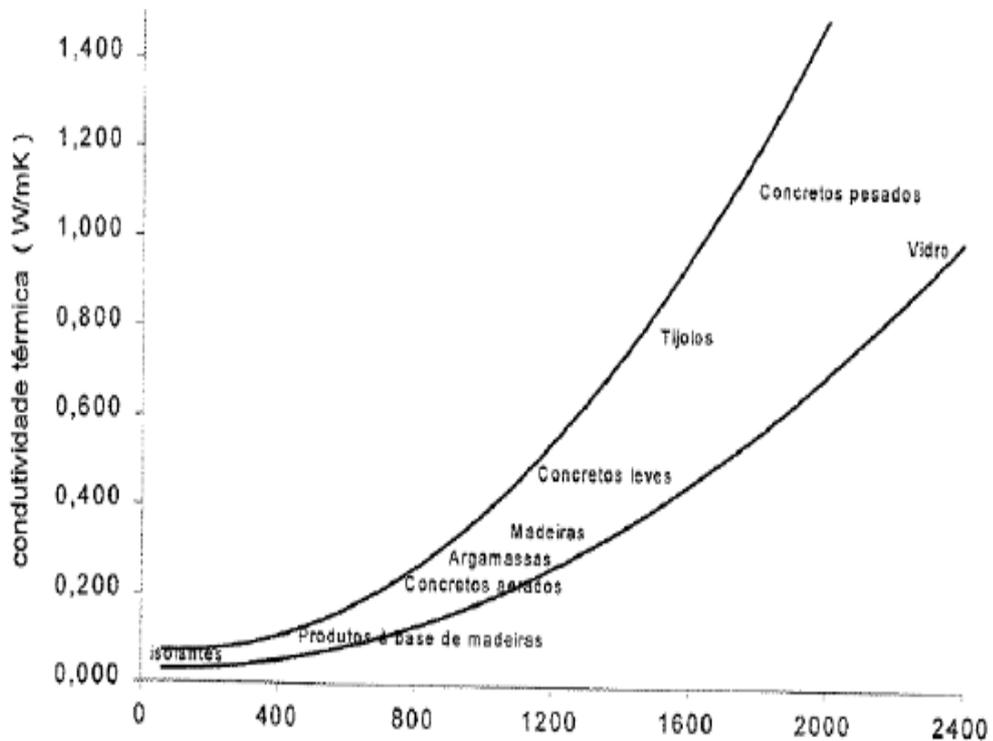
Akatsu e Sato (1988 apud OLIVEIRA, 2009) afirmam que a condutividade térmica é inversamente proporcional à quantidade de ar em um material e diretamente proporcional à massa específica aparente.

De acordo com Oliveira (2009), a microestrutura do agregado usado em compósitos cimentícios, assim como a porosidade também tem grande influência na condutividade térmica. Agregados com estrutura cristalina e poros abertos são melhores condutores de calor do que agregados de estrutura vítrea e poros fechados.

A baixa condutividade térmica dos materiais isolantes decorre principalmente da grande quantidade de ar presente entre as fibras ou confinado no processo de expansão de espumas e isolantes granulares (AQUILINO *et al.*, 2003 apud CINTRA, 2013).

A Figura 4 demonstra os efeitos da massa específica sobre a condutividade térmica de alguns materiais usados na construção civil.

Figura 4 – Variação da condutividade térmica em função da massa específica aparente



Fonte: STANCATO, 2000 apud OLIVEIRA, 2009.

Carletto (2005) destaca o *calor específico* (c_p) como outra propriedade térmica importante, principalmente no regime variável, e a qual representa a quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de um corpo de 1°C por unidade de massa, no caso o grama.

Outra medida importante, de acordo com Al-Homoud (2005) é a *resistência térmica* (R), que pode ser definida como uma medida da resistência ao fluxo de calor. A resistência térmica é diretamente proporcional a espessura do material, e inversamente proporcional a sua condutividade térmica, sendo expressa em ($\text{m}^2\text{K/W}$). Assim sendo, um objeto com alta resistência térmica é um mau condutor de calor, e portanto um bom isolante térmico (HALLIDAY e RESNICK, 2012).

Ao contrário das trocas térmicas por radiação, as trocas por condução não cessam na ausência de uma fonte de calor. É possível perceber no cotidiano que em construções submetidas à insolação, mesmo após várias horas sem Sol, mantêm-se aquecidas no interior, devido à continuidade das trocas por condução. Nesse aspecto, Cintra (2013) e Borges (2009) destacam a importância da *capacidade térmica*, que é uma propriedade dada em função do calor específico e da massa de material, e que expressa a capacidade de absorção, armazenamento e transmissão do fluxo de calor do material.

Borges (2009) destaca ainda a *difusividade térmica* como uma propriedade importante. Segundo ele, a difusividade térmica (α) é uma medida da rapidez com a qual o calor se propaga através de um material. Com ela é possível avaliar a capacidade do material de conduzir e de acumular energia térmica.

De acordo com Andrade *et al.* (2004 apud BORGES, 2009) uma alta difusividade implica em um aquecimento mais rápido e uma homogeneização do gradiente de temperatura sob o material também mais rápido. A difusividade pode ser determinada por meio de cálculos, dividindo-se a condutividade térmica pelo produto entre calor específico e massa específica aparente do material.

2.5 Isolantes térmicos

De acordo com Al-Homoud (2005), um isolante térmico é um material, ou combinação de materiais, que quando propriamente aplicados, são capazes de retardar o fluxo de calor por condução, convecção ou radiação.

Materiais isolantes apresentam propriedades dependentes da temperatura, que variam de acordo com a natureza do material e da faixa de temperatura usada (AL-HOMOUD, 2005).

Borges (2009) lista algumas das propriedades mais importantes dos isolantes térmicos como sendo: baixa condutividade térmica, baixa densidade, alto calor específico, baixa difusividade térmica, boa resistência mecânica e estabilidade química e física.

Carletto (2005) cita que o controle do fluxo de calor em materiais isolantes pode ser dividido em: por reflexão e por resistência. No primeiro caso, estão os materiais onde há domínio de transferência de calor por radiação, como o alumínio foil. No segundo caso, são usados materiais para controlar o fluxo de calor por condução. Materiais usados para esse fim são aqueles que têm uma baixa condutividade (usualmente fibrosos ou porosos).

Al-Homoud (2005) explica que materiais isolantes térmicos resistem à transferência de calor como resultado da presença de inúmeras células de ar microscópicas, que impedem (prevenindo o ar de se mover) a transferência de calor. É o ar aprisionado dentro do isolante que promove o isolamento térmico, e não o material em si. Esse é o caso da vermiculita, material abordado neste trabalho.

Borges (2009) divide os isolantes em três categorias: isolantes naturais, sintéticos e minerais. Na primeira categoria, Cintra (2013) e Borges (2009) destacam a celulose e a cortiça. Já no caso dos sintéticos, destacam-se o poliestireno expandido e o poliuretano. Quanto aos minerais, destacam-se as mantas de lã de vidro, formada por fibras de vidro e lã

de rocha, a lã mineral ou ainda o amianto, que apesar de bom isolante vem sendo banido devido à sua toxicidade.

2.6 Técnicas de Caracterização Térmica dos Materiais

Os métodos experimentais para determinação da condutividade térmica e resistência térmica dos materiais, podem ser divididos em dois grupos: métodos em regime permanente e métodos em regime transiente.

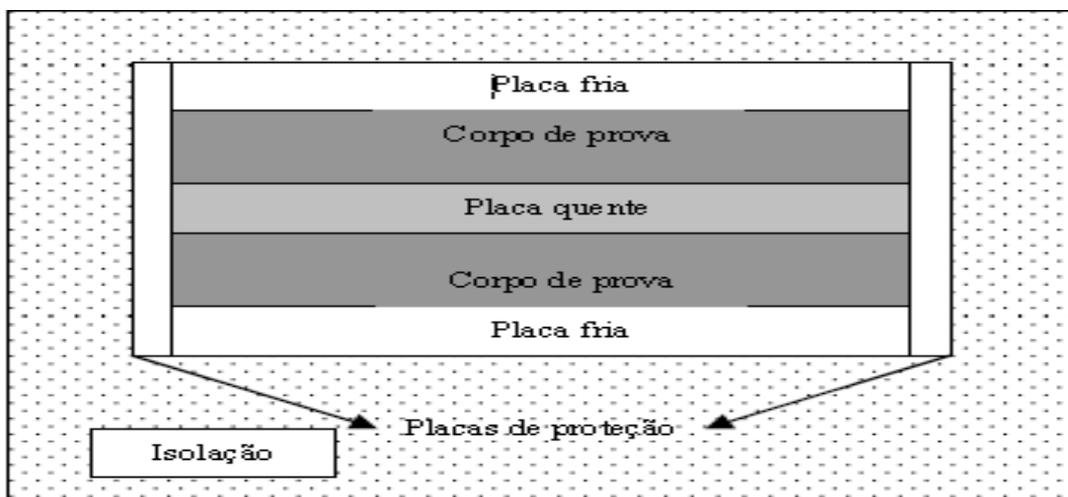
2.6.1 Métodos em regime permanente

De acordo com Sousa (2012) e Oliveira (2009), nestes métodos não há a intervenção do tempo, ou seja, não há variação de temperatura com o tempo, e dessa forma tais métodos permitem medir a condutividade térmica em um regime estacionário de calor.

2.6.1.1 Método da placa quente protegida

A ABNT NBR 15220 (2003) estabelece esse método, mostrado no esquema da Figura 5, para a determinação da resistência térmica e condutividade de materiais sólidos com resistência térmica acima de $0,02 \text{ m}^2\text{K/W}$ e condutividade térmica abaixo de $2\text{W}/(\text{m.K})$, classificados na categoria de materiais homogêneos e isotrópicos, materiais porosos termicamente homogêneos, e materiais termicamente não homogêneos, os quais no último caso só se pode determinar a resistência térmica, pois não podem ser descritos em termos de condutividade térmica.

Figura 5 – Esquema do método de placa quente protegida



Fonte: OLIVEIRA, 2009.

De acordo com a ABNT NBR 15220 (2003), e Oliveira (2009) o equipamento utilizado é constituído de uma placa quente, sobre a qual ficam distribuídos simetricamente dois corpos de prova idênticos, de espessuras conhecidas, e colocados entre duas placas frias isotérmicas. Fornece-se uma potência elétrica constante na seção de medição da placa quente, de modo a estabelecer uma diferença de temperatura adequada através dos corpos-de-prova.

A condutividade térmica é calculada através da Equação 4. O fluxo de calor é obtido à partir da potência dissipada através da placa quente e a diferença média de temperatura através dos corpos-de-prova é determinada usando-se termopares montados nas suas superfícies (NBR 15220, 2003).

$$k = \frac{q L}{2 A \Delta T} \quad (4)$$

Onde:

k = condutividade térmica (W/m.K)

q = potência dissipada pela placa quente (W)

L = espessura dos corpos de provas (m)

A = área de geração de fluxo de calor (m²)

ΔT = diferença de temperatura entre as faces opostas das amostras (K)

Para o cálculo da resistência térmica, pode-se utilizar a Equação 5:

$$R = \frac{L}{k} \quad (5)$$

Onde:

R = resistência térmica (m²K/W)

2.6.1.2 Método fluximétrico

De acordo com Sousa (2012), o método fluximétrico é um método para medição da condutividade térmica, no qual o regime permanente é atingido de forma mais rápida do que método da placa quente protegida. Oliveira (2009) destaca que tal método vem sendo aplicado a materiais manufaturados e isolantes térmicos de edificações. É possível o arranjo entre três tipos de configuração, de acordo com o número de amostras, fluxímetros e o posicionamento dos mesmos, como mostra a Figura 6.

A condutividade térmica pode ser calculada utilizando-se a Equação 4, descrita anteriormente.

A função dos fluxímetros é medir o fluxo de calor que os atravessa, no caso o mesmo que atravessa as amostras. Dessa forma, não é necessário conhecimento sobre a potência dissipada, como no caso do método da placa quente, para que se obtenha o fluxo de calor (SIMIONI, 2005 apud SOUSA, 2012).

2.6.2 Métodos em regime transiente

Nos métodos em regime transiente, as medidas de temperatura são efetuadas em função do tempo, e além da condutividade térmica dos materiais, identifica-se também a difusividade térmica e o calor específico dos mesmos.

2.6.2.1 Método do fio quente

De acordo com Santos (2002), o método do fio quente é o método de medida de condutividade térmica para materiais refratários mais usado hoje em todo o mundo, tanto nos centros de pesquisa, quanto nos laboratórios industriais. No entanto, ele pode ser utilizado para outros tipos de cerâmicos, e até mesmo polímeros.

De acordo com Cintra (2013), nesse método o cálculo da condutividade é feito à partir de uma determinada temperatura fixa, eliminando-se dessa forma o conceito de temperatura média, entre as faces quente e fria comumente utilizado nos cálculos de métodos calorimétricos. Segundo Santos (2002) o este método tem duas limitações: materiais condutores elétricos, e materiais de alta condutividade térmica.

São conhecidas quatro variações do método de fio a quente, nas quais a diferença se baseia no procedimento de medição de temperatura (CINTRA, 2013; SANTOS, 2002). São elas: padrão de fio quente, resistência do fio quente, dois termopares e fio quente paralelo.

De acordo com Oliveira (2009), ao passar uma corrente elétrica através de um fio metálico, preso entre a amostra, uma quantidade constante de calor, por unidade de tempo e por unidade de comprimento, é liberada pelo fio e se propaga através do material. O registro da variação de temperatura do fio é feito por um termopar soldado ao mesmo. Para fins de cálculo, o fio é considerado uma fonte de calor ideal, infinitamente longa e fina, circundada até o infinito pelo material cuja condutividade deseja-se avaliar (SANTOS, 2002).

O aumento da temperatura em um ponto junto ao fio está relacionado com a potência dissipada e com a condutividade térmica do corpo de prova, permitindo o cálculo do coeficiente de condutividade térmica a partir da Equação 7 (CINTRA, 2013).

$$k = \frac{q'}{4\pi} \cdot \frac{\ln(t_2/t_1)}{T_2 - T_1} \quad (7)$$

Onde:

k = condutividade térmica do material (W/mK)

q' = densidade linear de potência (W/m)

t_1 e t_2 = tempos contados à partir do início da liberação de calor (s)

T_1 e T_2 = excessos de temperatura no fio quente nos tempos t_1 e t_2 , em relação à temperatura de referência (K)

O valor de q' é dado pela Equação 8:

$$q' = \frac{V^2}{R} \text{ ou } q' = Ri^2 \quad (8)$$

Onde:

V = tensão nos terminais do fio quente (V)

R = resistência elétrica do fio (Ω/m)

i = corrente que passa pelo fio (A)

2.6.2.2 Sondas térmicas

Este é um método desenvolvido para meios porosos, onde a sonda pode assumir formato cilíndrico ou esférico. No caso da sonda cilíndrica, o modelo é basicamente igual ao do fio quente, porém no caso da sonda esférica, a impedância se difere consideravelmente (OLIVEIRA, 2009).

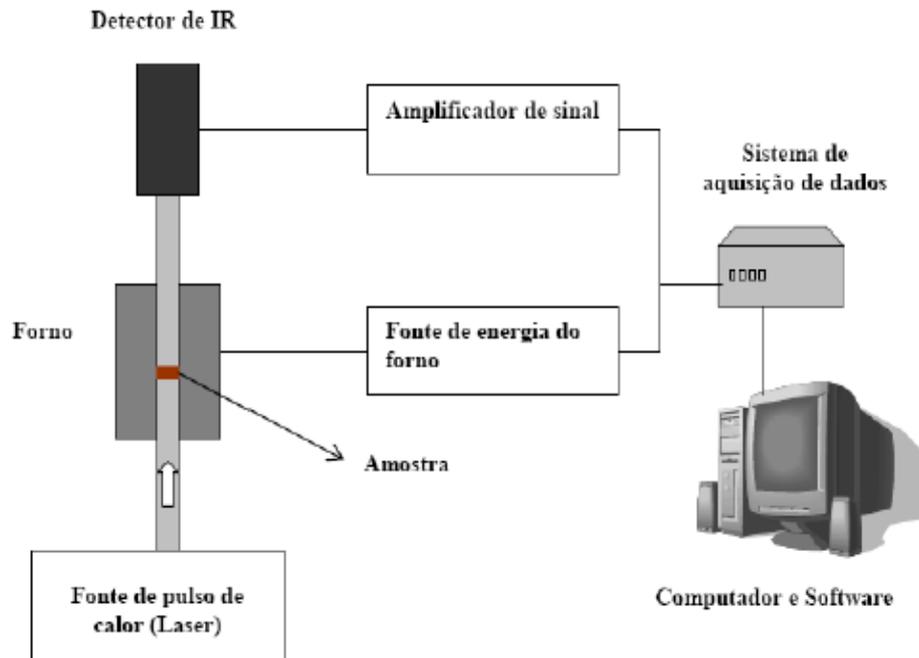
De acordo com Borges (2009), a sonda realiza medidas de condutividade, calor específico e difusividade, emitindo e recebendo calor na amostra em análise.

2.6.2.3 Método Flash

De acordo com Massard (2004 apud SOUSA, 2012), este é o método mais utilizado para medição de propriedades termofísicas em sólidos.

O método consiste em aplicar na face frontal de uma amostra, pequena, fina e de forma cilíndrica, um pulso de energia de alta intensidade e de curta duração, comumente gerado por um laser, lâmpada flash, ou feixe de elétrons, registrando-se o aumento de temperatura na face posterior (OLIVEIRA, 2009). Um esquema do método é mostrado na Figura 7.

Figura 7 – Esquema do método Flash



Fonte: OLIVEIRA, 2009.

De acordo com Sousa (2012) a condutividade térmica é calculada de forma indireta, após determinadas a difusividade térmica e calor específico, e conhecendo-se a massa específica do material.

2.7 Argamassas

De acordo com a ABNT NBR 13281 (2001), argamassas são misturas homogêneas de agregado(s) miúdo(s), aglomerante(s) inorgânico(s) e água, com a presença ou não de aditivos ou adições, e com propriedades de aderência e endurecimento. Visando a obtenção de propriedades específicas, podem ser usados aditivos, como retardadores de pega, redutores de permeabilidade e incorporadores de ar, ou adições, como material pozolânico e serragem (BEUTHER,2015).

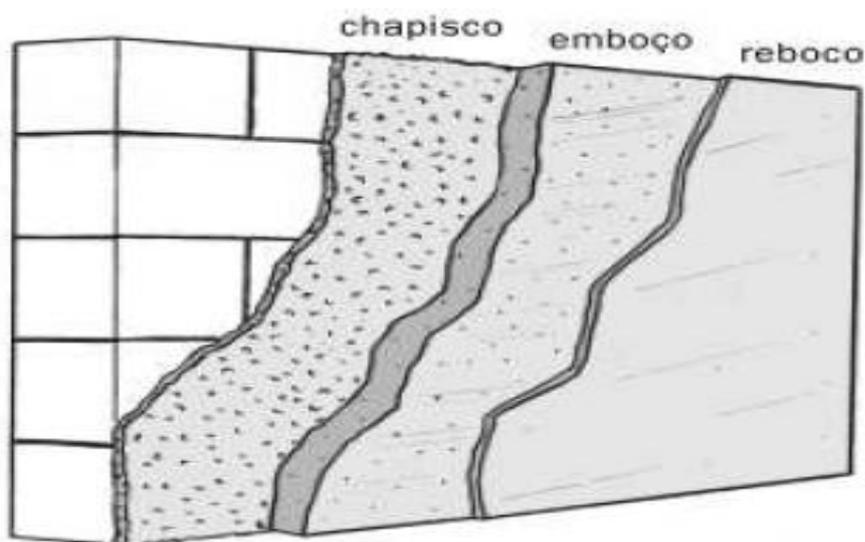
Entre as principais funções das argamassas, estão: a união de elementos de alvenaria; o revestimento de paredes, tetos, e pisos; acabamento superficial; isolamento termoacústico; segurança contra chamas e contra a infiltração de água e gases; e a recuperação de estruturas (BEUTHER, 2015; NASCIMENTO, 2008).

Assim, as argamassas são classificadas principalmente de acordo com sua função em argamassas para assentamento e argamassas para revestimento. No primeiro caso são as argamassas usadas na união de blocos ou tijolos de alvenaria, assim como na colocação de azulejos e ladrilhos. Já no segundo caso, são aquelas usadas na cobertura de pisos, paredes e tetos (NASCIMENTO, 2008).

No caso das argamassas produzidas com vermiculita com o objetivo de isolamento termoacústico, estas se encaixam na categoria de argamassas de revestimento. De acordo com a ABNT NBR 13529 (1995), um revestimento de argamassa é a cobertura de uma superfície com uma ou diversas camadas superpostas de argamassa, deixando como resultado, uma superfície apta ao acabamento final.

De acordo com Cintra (2013), o revestimento com argamassa usualmente tem várias camadas, cada uma com uma função específica. Os tipos mais comuns são o chapisco, o emboço, reboco e massa única (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND – ABCP, 2002). A Figura 8 mostra um esquema com as diversas camadas de um revestimento.

Figura 8 – Argamassas de revestimento



Fonte: ABCP, 2002.

O chapisco, que na verdade não é considerado como uma camada de revestimento, tem a função uniformizar a superfície de aplicação, regularizar a absorção da superfície da

base, e melhorar a aderência das camadas subsequentes (CINTRA, 2013; ABCP, 2002). O emboço por sua vez, tem como função nivelar a superfície da base, ou do chapisco se esse estiver presente. O reboco é a camada final dos revestimentos, usada sobre o emboço, com a função de uniformizar a superfície para o acabamento decorativo. Já o revestimento de massa única, que é aplicado em uma única camada, sobre o chapisco, e que cumpre as funções do emboço e do reboco, ou seja, regularização da base e acabamento (ABCP, 2002).

2.7.1 Materiais das argamassas

Segundo a ABNT NBR 7175 (2003), a cal hidratada é um pó seco obtido pela hidratação da cal virgem, a qual tem como composição química o hidróxido de cálcio, ou uma mistura de hidróxido de cálcio e magnésio, ou ainda uma mistura dos dois últimos com óxido de magnésio.

De acordo com Nascimento (2008), as argamassas de cal são normalmente usadas para emboço e reboco, devido à sua plasticidade, condições de endurecimento favoráveis a sua elasticidade e bom acabamento. Segundo Cintra (2013), a cal é um aglomerante que endurece devido à reação de carbonatação da cal em carbonato de cálcio, por meio da fixação do gás carbônico presente no ar. A cal preenche os vazios entre os grãos do agregado miúdo, melhorando a retenção de água e conseqüentemente, a trabalhabilidade (BEUTHER, 2015). No entanto essas não muito utilizadas devido à baixa resistência mecânica e endurecimento lento (ROMAN, s.d).

O cimento Portland é um material pulverulento, o qual apresenta como composição básica, silicatos e aluminosilicatos complexos, os quais, quando misturados à água, formam uma massa gelatinosa, mas finamente cristalina, que após um contínuo processo de cristalização, endurece, formando um material de elevada resistência mecânica (PORTAL DO CONCRETO, 2016)

No caso das argamassas simples de cimento Portland, os revestimentos apresentam baixa porosidade, maior resistência mecânica, e durabilidade, porém apresentam baixa retenção de água e plasticidade, o que acarreta em pouco trabalhabilidade (ROMAN, s.d). Nascimento (2008) afirma que neste caso, faz-se necessário o uso da cal para torna-las mais plásticas e facilmente trabalháveis, formando assim argamassas mistas, que são as mais utilizadas, devido a união dos aspectos positivos de ambos os aglomerantes.

Os agregados são materiais inertes, tal como a areia, pedras britadas, argila expandida, perlita, ou a própria vermiculita. Podem ser classificados de acordo com a granulometria em miúdos e graúdos, ou ainda de acordo com a sua massa específica, em leves (vermiculita,

argila expandida), normal (areias, pedras britadas) e pesadas (hematita, magnetita) (PORTAL DO CONCRETO, 2016).

2.7.2 Proporção de vermiculita utilizada em argamassas para isolamento

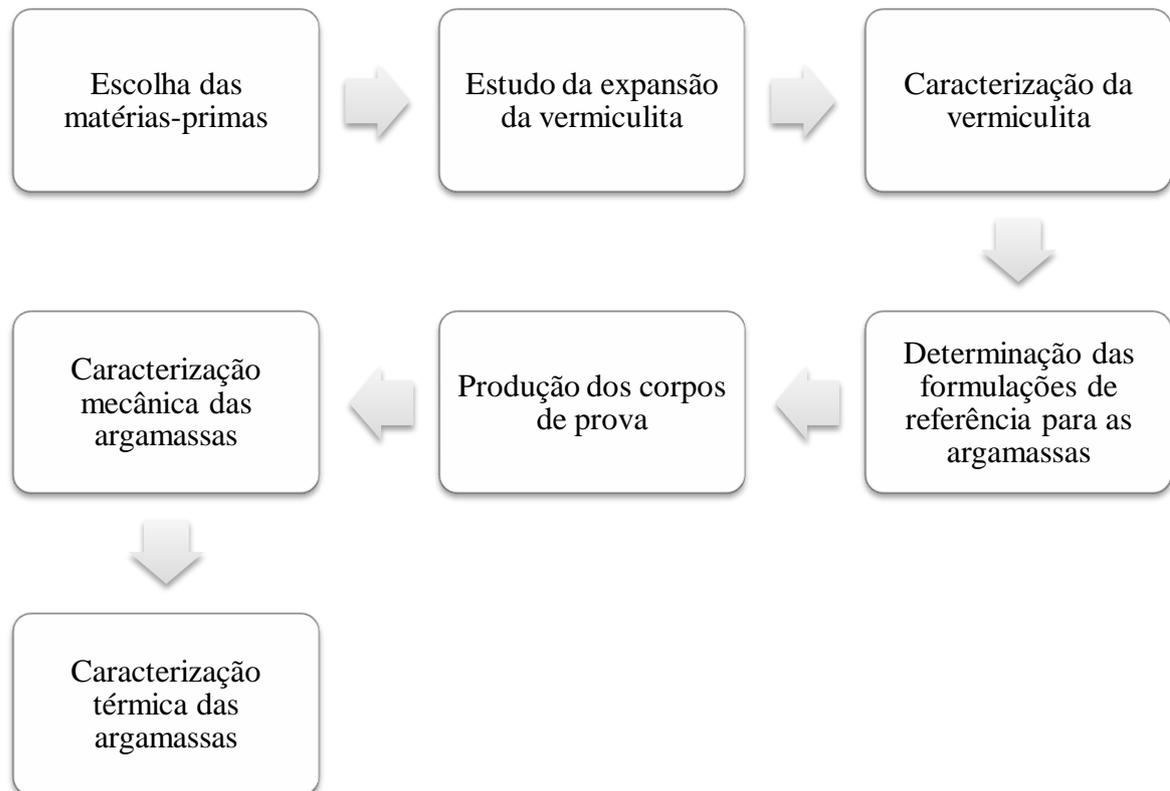
Entende-se por traço de uma argamassa ou concreto, a indicação da proporção em volume de seus componentes. O traço utilizado nas argamassas com vermiculita depende principalmente de sua aplicação. Conforme Refráttil (2016) e NTC Brasil (2016), para aplicação como isolante térmico em revestimentos de paredes, o traço mais comum é 3:1:1:1 (vermiculita: cal: cimento: areia), ou 3:1:1 (vermiculita: cal: cimento) no caso de aplicação como revestimento interno. De acordo com a JNE Representações (2016), o ideal para revestimentos é um traço de 1:5 (cimento: vermiculita), com a espessura dos revestimentos girando em torno de 20-30 mm.

No caso de isolamento de lajes, o concreto leve produzido com vermiculita deve apresentar um traço de 1:8 (cimento: vermiculita) para lajes com pouco trânsito, e 1:5 para lajes com trânsito, com camadas de 20-25 mm. Para um traço de 1:8 utiliza-se uma volume de 1,32 m² de vermiculita para aproximadamente 228 kg de cimento, e para um traço de 1:5 1,3 m² para 350 kg de cimento (JNE REPRESENTAÇÕES, 2016).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este tópico trata dos materiais utilizados na composição das argamassas e os métodos empregados neste estudo experimental. A sequência de desenvolvimento do trabalho contou com as seguintes etapas fundamentais, mostradas na Figura 9.

Figura 9 - Fluxograma das etapas de desenvolvimento do trabalho



Fonte: Produzido pela autora.

3.1 Matérias- primas

Utilizou-se na composição das argamassas produzidas neste trabalho, as seguintes matérias-primas:

- Aglomerantes: cimento Portland comum e cal hidratada da marca Votorantim;
- Agregado miúdo: areia fina ($\pm 0,18$ mm) de fabricante desconhecido;
- Agregado leve: vermiculita superfina ($-1,0+0,3$ mm) da marca Brasil Minérios, posteriormente expandida.

3.2 Metodologia experimental

3.2.1 Estudo da expansão da vermiculita

Realizou-se um estudo do processo de expansão da vermiculita para a determinação da temperatura e tempo mais adequados ao processo. Este estudo contou com as etapas descritas a seguir.

3.2.1.1 Expansão em forno elétrico

Aqueceram-se bruscamente amostras de vermiculita em um forno elétrico, nas temperaturas de 700°C, 800°C e 900°C. Para cada temperatura, manteve-se o material por dois períodos de tempo, de 5 e 10 minutos respectivamente.

Após a obtenção das amostras expandidas, avaliou-se qual par temperatura/tempo proporcionou a obtenção de um material com maior expansão e melhores características. Para tanto, observou-se as características do material expandido com o auxílio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

3.2.1.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Determinou-se a morfologia da vermiculita na forma natural e expandida utilizando o equipamento Shimadzu SSX-550, equipado com detector de elétrons secundários. Para tal, recobriram-se as amostras com ouro. A análise das amostras permitiu a escolha da temperatura e tempo mais adequados para a expansão da vermiculita a ser utilizada neste estudo.

3.2.1.3 Determinação da massa aparente e rendimento volumétrico

Encontrando-se o melhor conjunto temperatura e tempo, determinaram-se a massa específica aparente (MEA) e o rendimento volumétrico de expansão do material, segundo método proposto por Valdiviezo e Souza (2014). Com base no método, pesou-se uma quantidade de vermiculita (natural e expandida) em uma balança com 0,01 g de precisão. Colocou-se o material em um funil, abriu-se o orifício do funil, e descarregou-se o material numa proveta graduada de 100 mL. Mediu-se o volume do material, em mL. Calculou-se a MEA à partir da Equação (9).

$$MEA = \frac{\text{Massa da amostra (g)}}{\text{Volume da amostra (mL)}} \quad (9)$$

Calculou-se o rendimento volumétrico utilizando-se a Equação 10, ou seja, utilizando-se a relação entre o volume da amostra após expansão (sendo que este volume determina-se pelo método do funil citado anteriormente) e a massa do material antes da esfoliação (expansão).

$$\eta = \frac{\text{Volume do material após expansão (mL)}}{\text{Massa da amostra antes da expansão(g)}} \quad (10)$$

3.2.2 Caracterização da vermiculita

Antes de investigar-se a influência da vermiculita sobre as propriedades de argamassas usadas para isolamento, realizou-se um estudo de caracterização do mineral, que contou com os ensaios aqui detalhados.

3.2.2.1 Difração de Raios X (DRX)

Visando a obtenção das fases mineralógicas presentes nas amostras de vermiculita a serem utilizadas neste trabalho, utilizou-se o difratômetro Shimadzu XRD – 7000 nas seguintes condições de operação: radiação $\text{CuK}\alpha$ (35 KV/ 40 mA), velocidade do goniômetro $0,02^\circ$ em 2θ por passo, com tempo de contagem de 0,6 segundos por passo e coletados de 5° a 80° em 2θ . Efetuaram-se as interpretações dos espectros por comparação com padrões contidos no banco de dados PDF 02 (ICDD, 2003).

Realizou-se o ensaio para uma amostra de vermiculita natural e uma amostra de vermiculita expandida na temperatura e tempo de trabalho determinados durante o estudo de expansão.

3.2.2.2 Fluorescência de Raios X (FRX)

Para obtenção das composições químicas das vermiculitas natural e expandida nas condições de temperatura e tempo escolhidos, realizou-se o ensaio de FRX em equipamento da marca Shimadzu, modelo EDX-720. Realizaram-se as análises em pastilhas prensadas e sob vácuo e em termos de óxidos.

3.2.2.3 Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC)

Utilizou-se a Calorimetria Diferencial Exploratória (DSC) para investigar-se os principais eventos térmicos relacionados à remoção de água do material nas temperaturas entre 0 e 400°C em uma amostra não expandida. Para tal ensaio utilizou-se um calorímetro diferencial de varredura da marca Shimadzu, modelo DSC-60.

3.2.3 Determinação das formulações de referência

Após realizar-se o estudo da expansão da vermiculita, e determinada a temperatura e tempo de trabalho, realizou-se a determinação das formulações de referência. Escolheram-se três traços para a fabricação das argamassas contendo vermiculita, de acordo com as formulações propostas pela Refráttil (2016), NTC Brasil (2016) e JNE Representações (2016). Para efeitos de comparação, para as mesmas proporções, produziram-se mais três formulações, onde substituiu-se o teor do agregado leve (vermiculita) por agregado miúdo (areia). A Tabela 5 mostra as composições propostas.

Tabela 5 – Traços para composição das argamassas produzidas

Composição	Traços			
	Vermiculita	Areia	Cimento	Cal
1	3	1	1	1
2	3	-	1	1
3	5	-	1	-
4	-	4	1	1
5	-	3	1	1
6	-	5	1	-

Fonte: Produzido pela autora.

3.2.4 Fabricação dos corpos de prova

Para os ensaios de compressão, produziram-se três corpos de prova para cada composição, obtendo-se um total de 18 corpos de prova. Moldaram-se os corpos de prova em molde cilíndrico, com diâmetro de 50 mm e altura de 100 mm. Para o ensaio térmico, produziram-se placas retangulares com 30 mm x 30 mm, e espessura de 25 mm. Neste caso, produziu-se apenas uma placa para cada composição proposta.

Seguindo as orientações da ABNT NBR 13279 (2005), retiraram-se os corpos de prova dos moldes após 48 horas e realizou-se a cura ao ar, em temperatura ambiente, durante o período mínimo de 28 dias para realização dos ensaios.

3.2.5 Propriedades mecânicas dos corpos de prova contendo vermiculita

Seguindo as orientações da NBR 13279 (2005), testaram-se os corpos de prova após o período mínimo de 28 dias de cura e até a sua ruptura. O ensaio de resistência à compressão axial utilizado é descrito a seguir.

Testaram-se os corpos de prova cilíndricos utilizando uma máquina de ensaio mecânico EMIC modelo DL30000N, a uma taxa de incremento de tensão de 0,25 MPa/s. Posicionaram-se os corpos de prova diretamente sobre o prato inferior do equipamento, de forma centralizada, conforme Figura 10. Depois de realizados os ensaios dos três corpos de prova das seis composições, calculou-se a resistência à compressão uniaxial (MPa) de cada corpo de prova, dividindo-se a carga de ruptura encontrada pela área da seção transversal de cada um, e comparou-se os resultados obtidos.

Figura 10 – Ensaio de compressão uniaxial



Fonte: Produzido pela autora

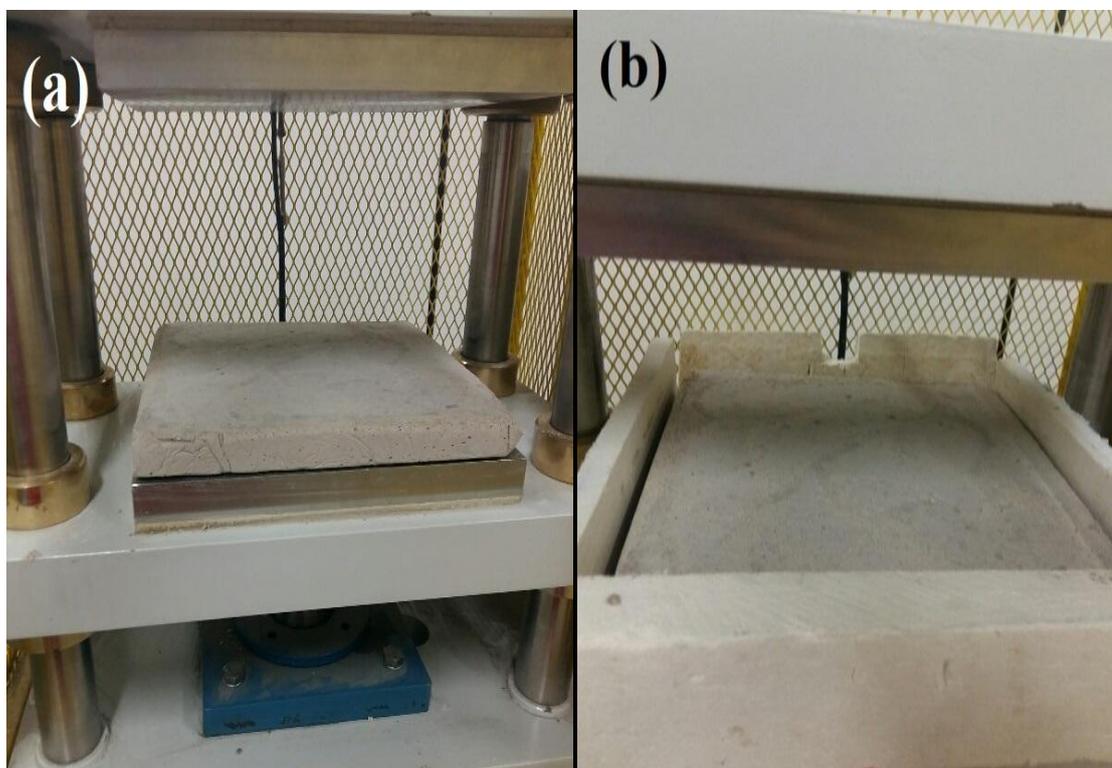
3.2.6 Avaliação das propriedades térmicas

A avaliação das propriedades térmicas visou à obtenção de um parecer sobre as principais propriedades térmicas discutidas neste trabalho, como condutividade térmica e resistividade térmica.

3.2.6.1 Análise qualitativa da condutividade térmica e resistividade térmica

Para analisar-se de forma qualitativa a condutividade térmica das argamassas produzidas, montou-se o esquema mostrado na Figura 11.

Figura 11 – Esquema montado para avaliação da condutividade



Fonte: Produzido pela autora.

Nesse esquema utilizaram-se os corpos de prova cerâmicos em forma de placa e uma prensa mecânica modelo SL 12/20, com potência de 3000 W possuindo dois termopares acoplados a cada uma de suas placas superior e inferior. Utilizou-se a placa superior do equipamento como uma placa fria, permanecendo esta sem aquecimento externo durante todo o ensaio, enquanto ajustou-se a temperatura da placa inferior para atuar como uma placa quente.

Posicionou-se o corpo de prova entre as placas, e ajustou-se o equipamento até que houvesse o contato entre o mesmo e ambas as placas. Realizou-se o isolamento nas laterais, para evitar-se a perda de calor para o ambiente.

Ajustou-se a temperatura da placa quente para dois valores distintos. Utilizou-se para tanto, uma temperatura de 50°C no primeiro caso, para simular-se uma situação real de conforto térmico, onde 50°C representa a temperatura de uma parede exposta à radiação solar durante o dia. No segundo caso, utilizou-se uma temperatura igual a 100°C, para efeitos de análise da influência da temperatura sob a condutividade térmica do material. Em ambos os casos realizou-se o ensaio pelo tempo de 30 minutos, registrando-se a temperatura da placa fria, fornecida pelo equipamento, em intervalos regulares de 5 minutos.

Registradas as temperaturas, construíram-se gráficos comparativos de variação de temperatura com o tempo para cada composição proposta e temperatura de referência da placa quente. A variação de temperatura com o tempo é uma função linear, ou seja, a temperatura da placa fria aumenta de um valor constante para intervalos de tempo semelhantes. Sendo assim, a partir da inclinação da reta tangente aos gráficos construídos para o ensaio, obteve-se a taxa de variação de temperatura com o tempo para as placas frias. Registrou-se tais resultados, e com base nestes fez-se uma análise qualitativa da condutividade térmica das diferentes argamassas produzidas, relacionando-se a taxa de variação de temperatura no tempo com essa propriedade.

Quanto à resistividade térmica, como a espessura dos corpos de prova foram semelhantes, avaliou-se a mesma com base na relação inversa existente entre ela e a condutividade térmica, conforme Equação (5).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

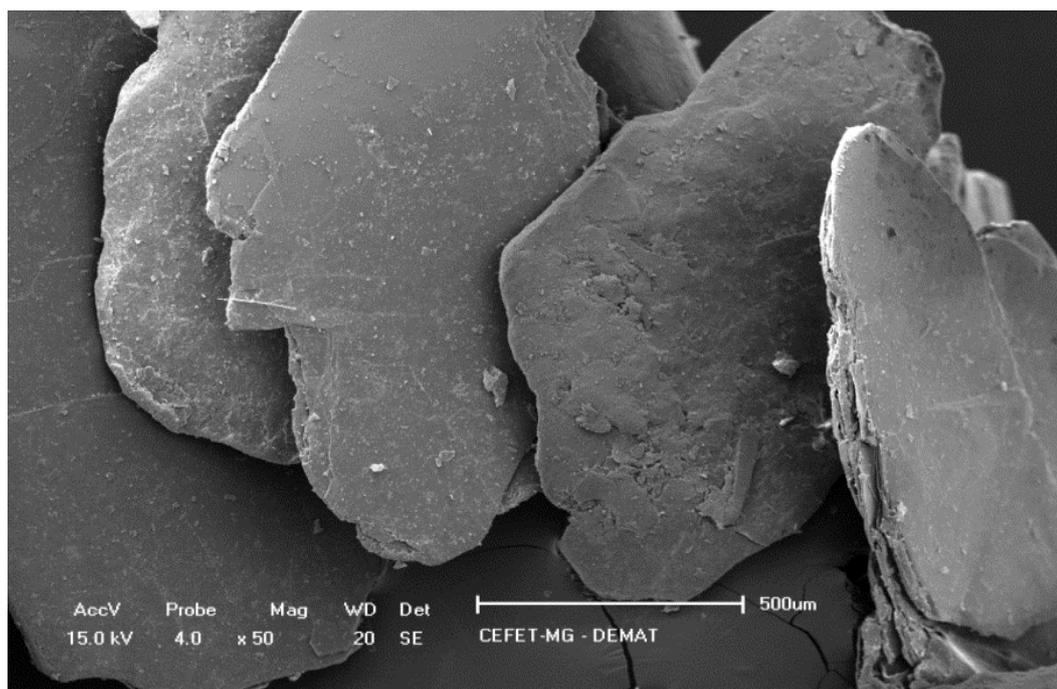
4.1 Estudo da expansão da vermiculita

Após realizar-se a expansão a expansão da vermiculita nas faixas de temperatura e tempo propostos, analisaram-se as amostras no MEV, obtendo-se os resultados mostrados a seguir.

4.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Obteve-se a morfologia da vermiculita na forma natural e expandida através da Microscopia Eletrônica de Varredura. A Figura 12 apresenta o resultado obtido para a amostra em sua forma natural, sem expansão, para uma ampliação de 50 vezes. Observa-se nesta imagem a estrutura tipicamente lamelar da vermiculita.

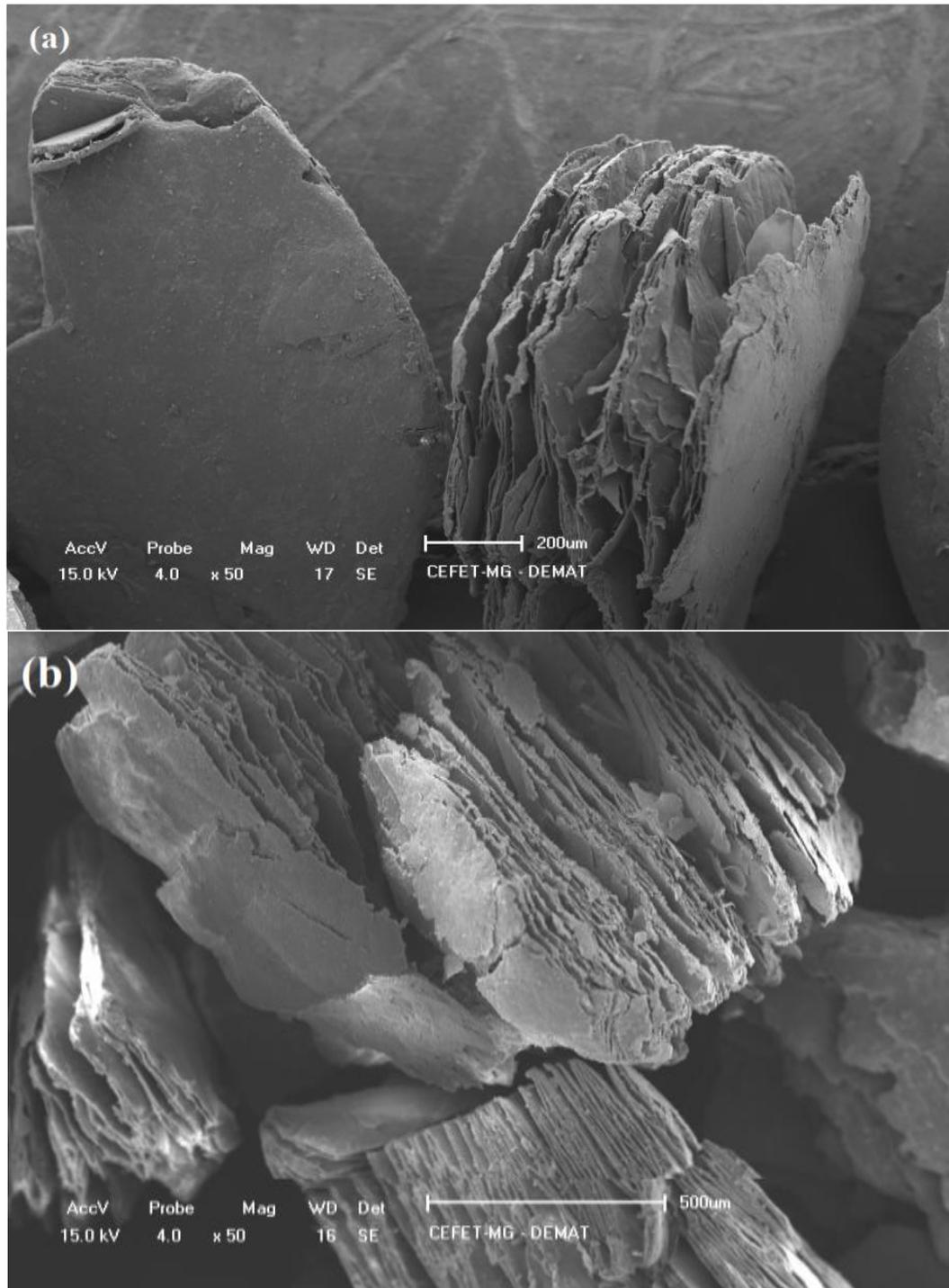
Figura 12 – Morfologia da vermiculita em sua forma natural



Fonte: Produzido pela autora.

A Figura 13 mostra a morfologia após o aquecimento na temperatura de 700°C, para intervalos de 5 e 10 minutos (respectivamente). Observa-se nessa temperatura a esfoliação do material, caracterizada pelo distanciamento das lamelas e aumento no volume dos flocos. Também se observa a influência do tempo sobre a esfoliação, uma vez que para o tempo de 10 minutos, em detalhe na Figura 13 (b), mais flocos expandidos de vermiculita são visíveis, comparativamente à Figura 13 (a).

Figura 13 – Morfologia para aquecimento a 700°C e (a) 5 minutos (b) 10 minutos

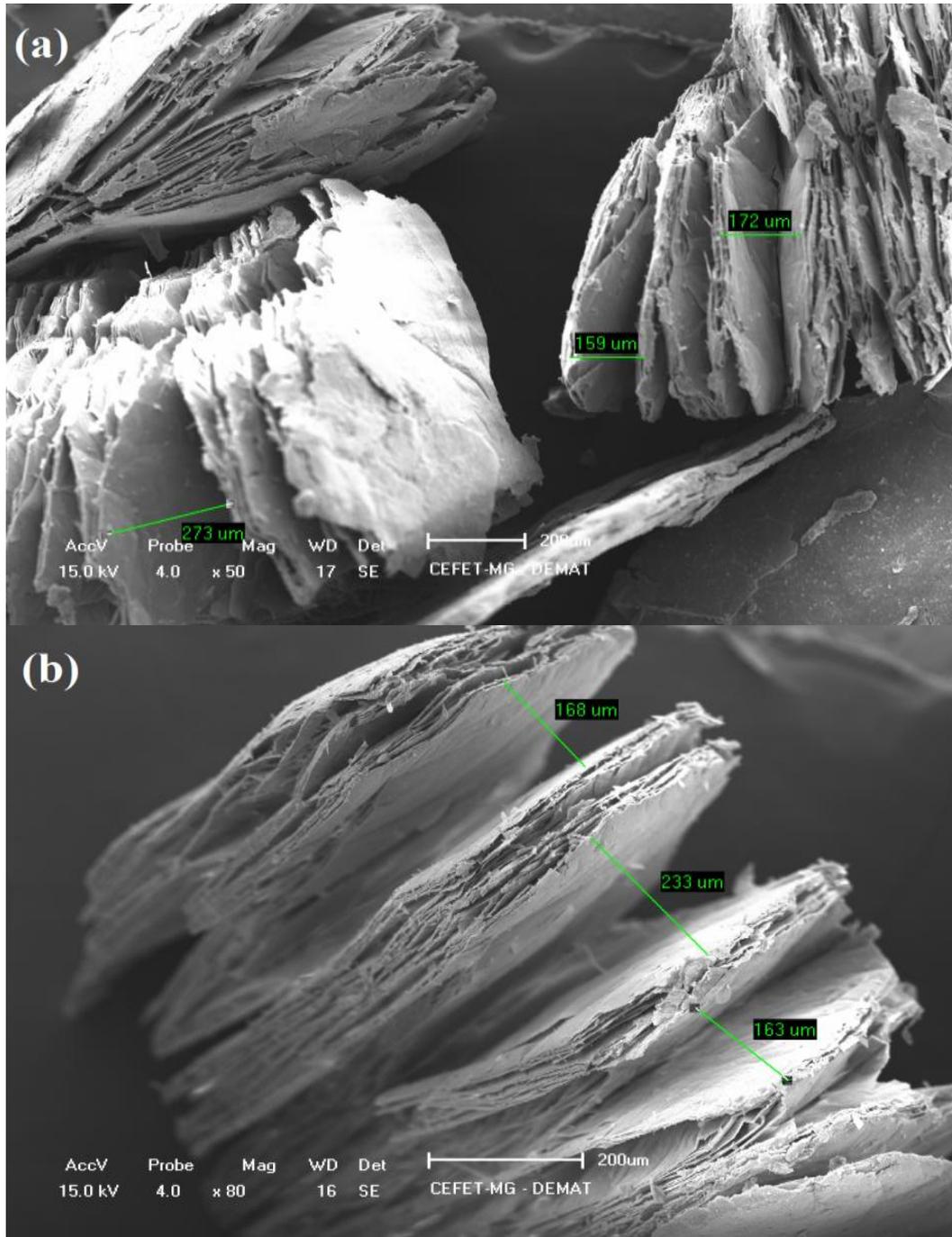


Fonte: Produzido pela autora.

Para a temperatura de aquecimento de 800°C (Figura 14) observou-se maior uniformidade na expansão do material, apresentando estas amostras mais flocos expandidos.

Não houve grandes variações observáveis em termos do espaçamento entre lamelas, quando analisado o tempo de permanência no forno, como mostrado nas Figuras 14 (a) e (b).

Figura 14 – Morfologia para aquecimento a 800°C e (a) 5 minutos (b) 10 minutos

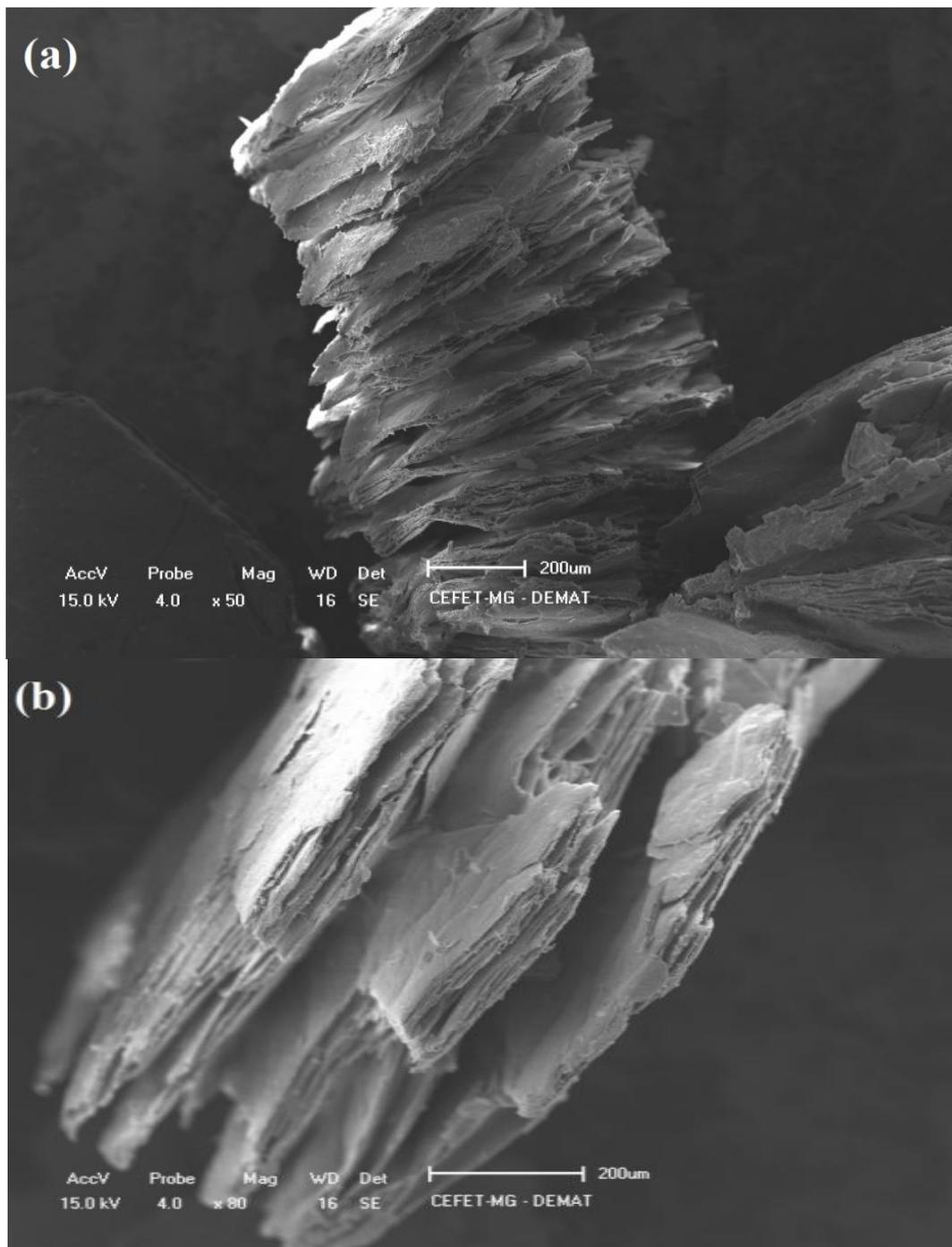


Fonte: Produzido pela autora.

Nas amostras aquecidas a 900°C, em detalhes nas Figuras 15 e 16, observou-se uma não uniformidade na expansão. Apesar de alguns flocos apresentarem elevado grau de esfoliação, Figura 15 (a) e Figura 16 (a), outros sofreram menor expansão, mesmo com tempo

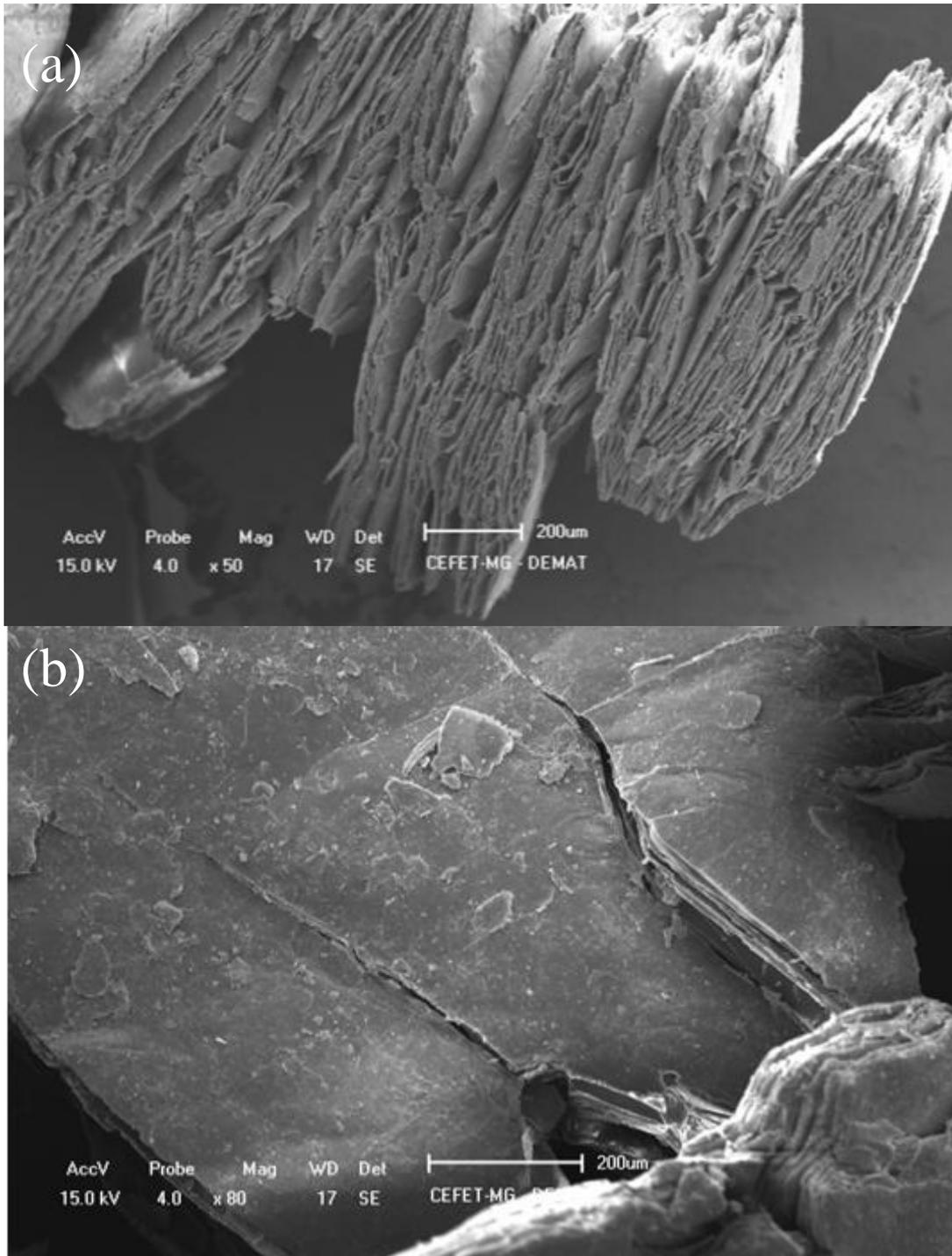
de permanência no forno semelhante, vide Figura 15 (b). Além disso, observou-se algumas trincas na superfície dos flocos, como mostrado na Figura 16 (b). Neste caso, a temperatura de 900°C pode ter sido muito elevada para uma amostra de granulometria superfina como a utilizada, levando à oxidação da amostra, e sendo talvez tal temperatura mais indicada à expansão da vermiculita de maior granulometria.

Figura 15 – Morfologia para expansão a 900°C e (a) 5 min (b) 10 min



Fonte: Produzido pela autora.

Figura 16 – Morfologia para expansão a 900°C (a) 10 min (b) trinca



Fonte: Produzido pela autora.

Após essa avaliação definiu-se que a relação temperatura de aquecimento/tempo de residência no forno, para a expansão da vermiculita, seria de 800°C/10 minutos, uma vez que, essa relação proporcionou a obtenção de um material com maior grau de expansão e melhores características morfológicas.

4.1.2 *Massa específica aparente e rendimento volumétrico*

Os resultados do teste para determinação da massa específica aparente e rendimento volumétrico são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Massa específica aparente e rendimento volumétrico

Amostra	Massa	Volume	Massa específica aparente	Rendimento volumétrico η
Vermiculita natural	30,00 gramas	36,00 mL	83,33 g/mL	-
Vermiculita expandida (800°C/10 min)	25,68 gramas	96,00 mL	26,75 g/mL	3,20 mL/g

Fonte: Produzido pela autora.

Observa-se primeiramente uma perda de massa comparando-se a amostra natural e expandida. Esse era um resultado esperado, considerando-se a perda de água sofrida pelo material no processo de expansão. Observa-se também um aumento de volume considerável, o que afeta diretamente a massa específica aparente das amostras, apresentando a amostra expandida uma massa específica bem inferior à da amostra natural.

O rendimento volumétrico encontrado foi de 3,20 mL/grama de material. Esse rendimento é baixo comparado às possibilidades de expansão da vermiculita discutidas anteriormente. No entanto, no presente trabalho utilizaram-se amostras de vermiculita superfina, e quanto maior a granulometria, maior é a capacidade de expansão do material. De acordo com Santos e Navajas (1981 apud VALDIVIEZO e SOUZA, 2010) esse comportamento deve-se ao fato de que nas placas de maior granulometria as moléculas de água têm de se deslocar por maiores distâncias, ou seja, as barreiras estruturais são maiores para saírem de dentro do espaço intercamada. Dessa forma, aumentando-se a granulometria, aumenta-se a velocidade de rompimento da camada de água, gerando-se flocos mais esfoliados de material.

4.2 Caracterização da vermiculita

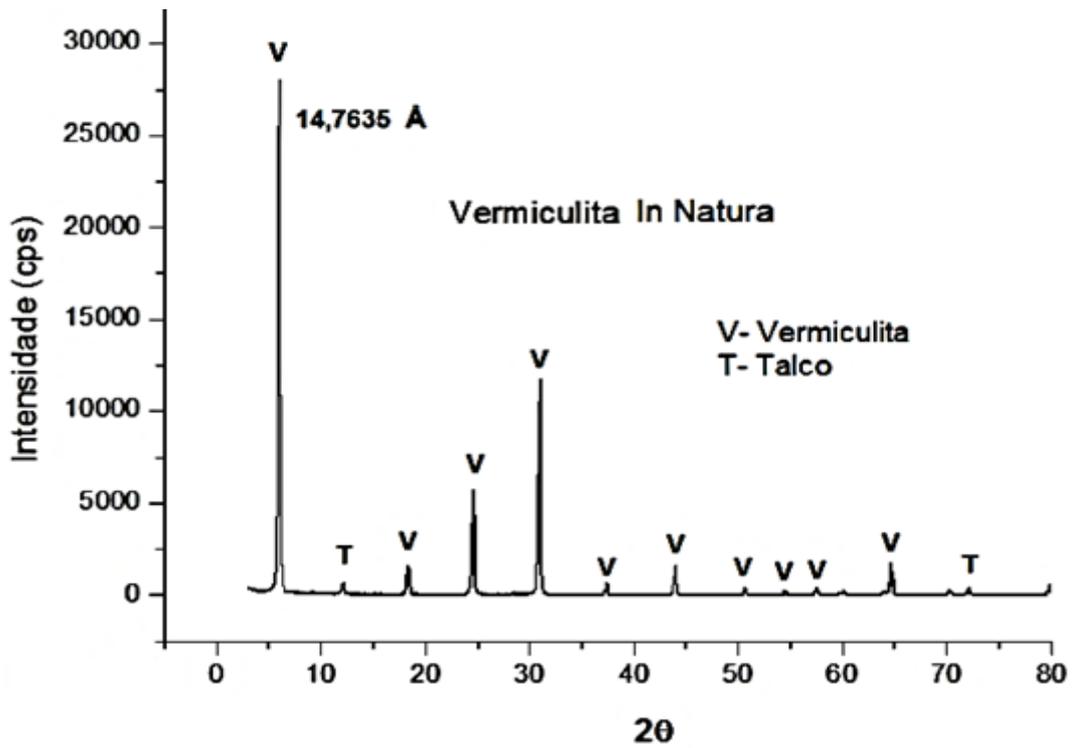
4.2.1 Difração de Raios-X

Os resultados de Difração de Raios X são apresentados nas Figuras 17 e 18, que ilustram os difratogramas das vermiculitas nas formas *in natura* e expandida a 800°C por 10 minutos, respectivamente. Identificou-se que as amostras são formadas pela mistura de fases mineralógicas interestratificadas de vermiculita com talco. Após a expansão a 800°C por 10 minutos, observa-se a decomposição principalmente da fase vermiculita e uma maior definição dos picos da fase talco. Segundo Tsirambides e Michailidis (1999) esse resultado é consequência da transformação que ocorre com a vermiculita devido o processo de expansão, que provoca desequilíbrio na sequência de empilhamento desse mineral modificando sua rede cristalina.

O difratograma de raios X da vermiculita *in natura* apresentou o pico característico desse argilomineral com uma distância interplanar de 14,7 Å na posição $2\theta = 6,1^\circ$. Outros picos característicos são observados nas posições $2\theta = 12,2^\circ$ (7,2762 Å), $18,3^\circ$ (4,8371 Å), $24,6^\circ$ (3,6219 Å), $31,1^\circ$ (2,8919 Å), $37,3^\circ$ (2,4073 Å), $43,9^\circ$ (2,061 Å), $50,7^\circ$ (1,7996 Å), $54,5^\circ$ (1,6817 Å) e $59,99^\circ$ (1,5398 Å). Os resultados obtidos no trabalho de Ugarte *et al.* (2004) corroboram o observado neste caso.

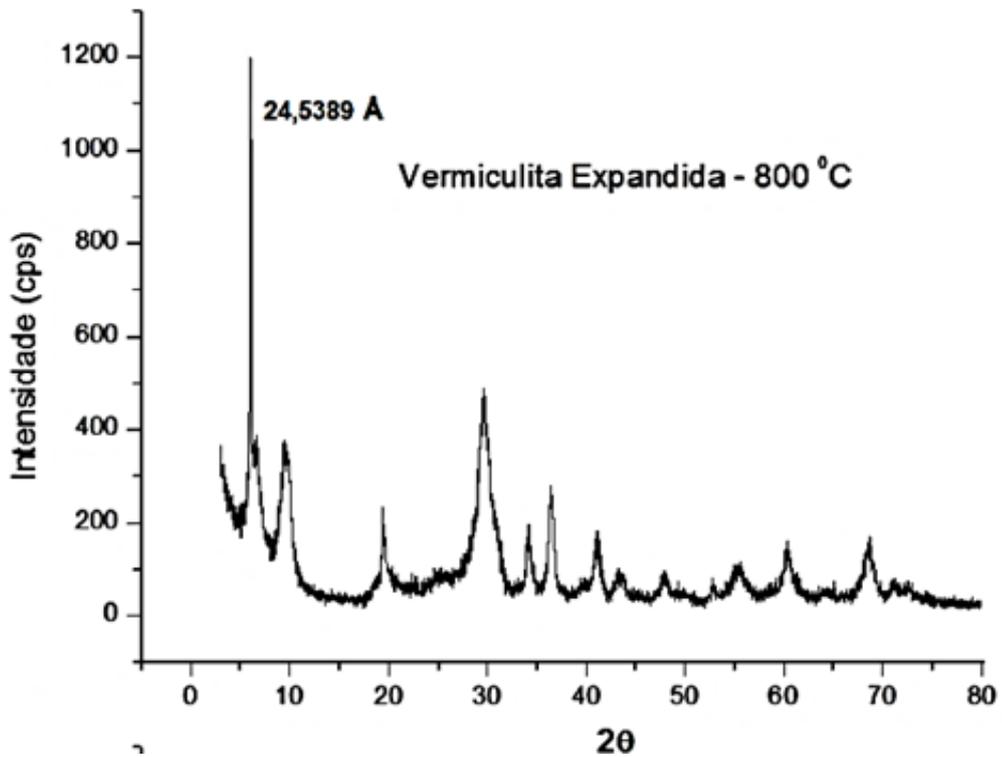
A vermiculita expandida a 800°C também apresentou o pico característico, mas ocorreu um aumento do espaçamento basal (23,7 Å, respectivamente). Esse aumento no espaçamento basal já era esperado devido ao fato da água de coordenação se ligar mais fracamente que as hidroxilas aos íons Mg^{2+} da estrutura cristalina (BRINDLEY *et al.*, 1980) e por causa dessa ligação fraca a água contida entre as suas lâminas transformar-se em vapor fazendo com que as partículas explodam e transformem-se em flocos sanfonados (expandidos) que aprisionam consigo células de ar inerte.

Cabe ressaltar que os difratogramas de Raios X das vermiculitas podem apresentar orientação preferencial por causa dos filossilicatos presentes. No entanto, a identificação de filossilicatos por DRX é muito complexo devido às distorções ocasionadas pela orientação preferencial, bem como pela grande variedade deste grupo de mineral e suas complexas relações.

Figura 17 – Difratoograma da vermiculita *in natura*

Fonte: Produzido pela autora.

Figura 18- Difratoograma da vermiculita expandida (800°C - 10 min)



Fonte: Produzido pela autora.

4.2.2 Fluorescência de Raios X (FRX)

Os resultados de FRX obtidos com as amostras de vermiculita natural e expandida são apresentados nas Tabelas 7 e 8, respectivamente. Conforme pode-se observar, os principais óxidos que compõem as amostras são: SiO₂, MgO, Al₂O₃ e Fe₂O₃. Os resultados aproximam-se bastante das composições mostradas na Tabela 1, referentes à composição química das principais vermiculitas comerciais brasileiras. A maior diferença nota-se no teor de óxido de magnésio, o qual no presente trabalho apresentou um valor um pouco mais elevado.

Comparando-se as duas tabelas, observa-se que não houve uma variação muito significativa na composição química das amostras natural e expandida em termos de seus principais óxidos.

Tabela 7 – Composição química da amostra de vermiculita natural

Composição	%
SiO ₂	43,575
MgO	30,291
Al ₂ O ₃	12,956
Fe ₂ O ₃	10,749
TiO ₂	1,027
CaO	0,889
Cr ₂ O ₃	0,343
MnO	0,133

Fonte: Produzido pela autora.

Tabela 8 – Composição química da amostra de vermiculita expandida (800°C - 10 min)

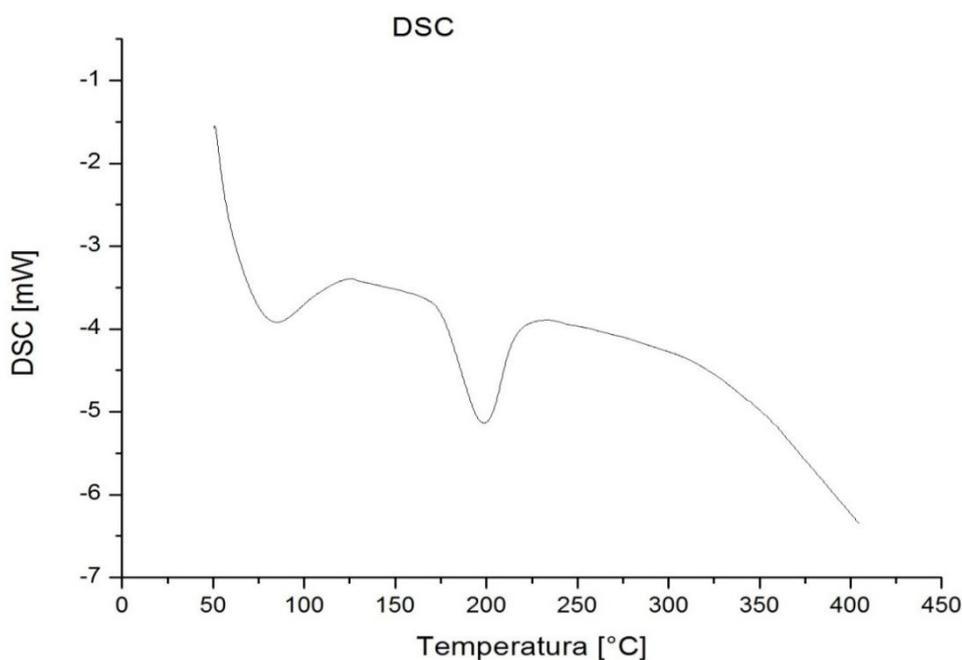
Composição	%
SiO ₂	39,050
MgO	36,231
Al ₂ O ₃	13,788
Fe ₂ O ₃	8,320
TiO ₂	1,072
Cr ₂ O ₃	0,473
MnO	0,135
CaO	0,088

Fonte: Produzido pela autora.

4.2.3 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

A Figura 19 apresenta o resultado do ensaio de DSC realizado em uma amostra da vermiculita natural. Pela análise da curva de DSC observam-se dois eventos térmicos que ocorrem na faixa de temperatura entre 0 e 400°C. O primeiro ocorre em torno de 90°C, e corresponde à evaporação da água adsorvida no material. O segundo evento ocorre na faixa de temperatura de 200°C, nessa temperatura há a perda de água de coordenação presente no espaço interlamelar. Esses resultados condizem com os argumentos discutidos por Silveira (2005) e Ugarte *et al.* (2008) sobre a remoção de água do material de acordo com a temperatura de aquecimento.

Figura 19 – Resultados da análise de DSC



Fonte: Produzido pela autora.

4.3 Fabricação dos corpos de prova

A Figura 20 mostra alguns corpos de prova cilíndricos e em forma de placas produzidos. Pode-se afirmar que após a cura de 28 dias os mesmos não apresentaram trincas superficiais, indicando que o processo de obtenção desses realizou-se de forma satisfatória. Entretanto, para uma melhor adequação dos testes mecânico e térmico, lixaram-se os mesmos para eliminar qualquer rebarba ou aresta livre existente, obtendo-se assim uma homogeneidade bem regular da superfície.

Figura 20 – Corpos de prova produzidos para os testes

Fonte: Produzido pela autora.

4.3.1 Ensaio de compressão

Os resultados dos ensaios de compressão uniaxial para as seis composições propostas são mostrados nas Tabelas 9 e 10, que contêm os resultados para os corpos de prova contendo vermiculita e areia, respectivamente.

Analisando-se comparativamente as Tabelas 9 e 10, os resultados apontam que para a composição de traços 3:1:1 o valor médio para a tensão máxima suportada foi de 1,33 MPa, um valor inferior ao encontrado para sua composição equivalente em areia, 4:1:1, para a qual a média foi de 6,43 MPa..

Para a composição de traços 3:1:1 composta de vermiculita, a média para a tensão máxima suportada encontrada foi de 1,15 MPa, já para a composição de traços 3:1:1 composta de areia, encontrou-se novamente um valor mais elevado, igual a 6,66 MPa.

Por fim, para a composição de traços 5:1 contendo vermiculita a média da tensão máxima suportada encontrada foi de 0,50 MPa, e é possível observar que apenas uma medida foi realizada com precisão, isso porque os demais corpos de prova deformaram-se antes mesmo que o equipamento fosse capaz de detectar valores de tensão. Quanto aos corpos de prova equivalentes em areia, o valor médio encontrado foi de 4,59 MPa.

Tabela 9 – Ensaio de compressão uniaxial – Corpos de prova contendo vermiculita

Corpos de prova contendo vermiculita	Tensão máxima (MPa)			
	C1	C2	C3	Média
Traços				
3:1:1:1	1,70	0,80	1,50	1,33
3:1:1	1,88	0,63	0,93	1,15
5:1	-	0,99	0,01	0,50

Fonte: Produzido pela autora.

Tabela 10 – Ensaio de compressão uniaxial – Corpos de prova contendo areia

Corpos de prova contendo areia	Tensão máxima (MPa)			
	C1	C2	C3	Média
Traços				
4:1:1	6,99	6,27	6,03	6,43
3:1:1	7,00	6,37	6,62	6,66
5:1	4,74	4,21	4,83	4,59

Fonte: Produzido pela autora.

Comparando-se as Tabelas 9 e 10 é possível perceber uma maior homogeneidade nos resultados obtidos com os corpos de prova contendo adições de areia em substituição a vermiculita. Além disso, os dados obtidos demonstram que as amostras de argamassas contendo vermiculita apresentaram em todos os casos uma resistência mecânica inferior às argamassas contendo areia em substituição a vermiculita expandida. Este era um resultado esperado para esse trabalho, uma vez que a areia apresenta maior densidade e maior resistência mecânica que a vermiculita em seu estado esfoliado, o que influencia diretamente a qualidade das argamassas produzidas. Novamente, nota-se o efeito da porosidade, elevada no mineral em estudo, e a qual afeta negativamente a resistência mecânica de materiais (CINTRA, 2013).

Em geral, existe uma relação fundamental inversa entre a porosidade e a resistência mecânica de sólidos, ou seja, um aumento na porosidade tem como consequência direta a diminuição da resistência mecânica (QUARCIONI, 2009). Isso fica evidente principalmente na última composição analisada, que utiliza um elevado teor de vermiculita, e cuja qual a resistência mecânica fora tão baixa que a argamassa falhou ainda no início do ensaio.

4.4 Análise qualitativa das propriedades térmicas das argamassas produzidas

As Tabelas 11 e 12 apresentam as taxas de variação de temperatura no tempo obtidas para cada formulação de argamassa produzida, e para as temperaturas de 50°C e 100 °C da placa quente, respectivamente. Em ambos os casos, determinou-se também a redução percentual na taxa de variação de temperatura comparando-se as composições com traços equivalentes de areia e vermiculita. Os gráficos utilizados para o cálculo da taxa de variação podem ser consultados no APÊNDICE A.

Tabela 11 – Taxa de variação de temperatura - T placa quente = 50°C

Composições - Traços	Taxa de variação de temperatura (°C/min)	Redução percentual da taxa de variação com a adição de vermiculita
	T _{placa quente} = 50°C	
3:1:1:1- Vermiculita	0,066	10,81%
4:1:1 - Areia	0,074	
3:1:1- Vermiculita	0,064	37,86%
3:1:1 - Areia	0,103	
5:1 - Vermiculita	0,050	Não houve redução
5:1 - Areia	0,046	

Fonte: Produzido pela autora.

Tabela 12 – Taxa de variação de temperatura - T placa quente = 100°C

Composições - Traços	Taxa de variação de temperatura (°C/min)	Redução percentual da taxa de variação com a adição de vermiculita
	T _{placa quente} = 100°C	
3:1:1:1- Vermiculita	0,180	33,33%
4:1:1 - Areia	0,270	
3:1:1- Vermiculita	0,173	51,81%
3:1:1 - Areia	0,359	
5:1 - Vermiculita	0,136	46,67%
5:1 - Areia	0,255	

Fonte: Produzido pela autora.

Observa-se inicialmente que para a temperatura de 100°C da placa quente a temperatura da placa fria varia a uma taxa maior com o tempo do que no experimento realizado com a placa quente a 50°C.

Comparando-se a amostra com vermiculita de traços 3:1:1:1 e a equivalente em areia, 4:1:1, percebe-se que a incorporação de vermiculita no lugar de areia, gera uma redução de 10,81% na variação da taxa de variação de temperatura com o tempo. Esse resultado fica ainda mais evidente para a temperatura de 100°C, na qual a redução encontrada foi de 33,33%.

Para as composições de traços 3:1:1 com vermiculita e a substituta com areia, respectivamente, percebe-se novamente que as taxas de variação de temperatura com o tempo para a composição sem vermiculita foram maiores que as taxas para a composição com adição do mineral, com comportamento semelhante ao discutido anteriormente também à 100°C.

Analisando-se por fim os resultados dos testes utilizando composições de traços 5:1 com vermiculita e 5:1 com areia, nota-se um comportamento diferente para a temperatura de 50°C, na qual a taxa de variação de temperatura da placa fria com o uso da amostra de vermiculita foi um pouco superior à da amostra sem vermiculita. No entanto, observa-se para 100°C o mesmo comportamento observado nos ensaios anteriores, onde a amostra sem adição de vermiculita permitiu uma maior variação de temperatura. Percebeu-se durante o ensaio que na placa de vermiculita produzida, devido à sua fragilidade, formaram-se algumas trincas quando colocada entre as placas quente e fria, o que pode ter contribuído para esse comportamento observado, comprometendo parcialmente os resultados para temperaturas inferiores.

Relacionando-se a taxa de variação de temperatura da placa fria com a condutividade térmica das placas de argamassa produzidas para este trabalho, pode-se dizer que, segundo as análises feitas, em praticamente todas as composições de argamassas comparadas, as placas contendo vermiculita expandida apresentaram menor condutividade térmica que as placas contendo areia em seu lugar. Isso demonstra o efeito isolante esperado com a adição deste material.

Considerando-se que há uma relação inversamente proporcional entre condutividade térmica e resistividade térmica, como demonstrado na Equação (5), pode-se ainda afirmar que as argamassas com a incorporação de vermiculita apresentam maior resistividade térmica do que as argamassas de referências com uso de areia.

Comparando-se as composições com vermiculita, não se notam grandes diferenças quanto às taxas de variação de temperatura obtidas. No entanto, ainda assim é possível observar-se que a composição de traços 5:1, com o maior teor de vermiculita entre todas as composições feitas, proporcionou menor variação de temperatura da placa fria, indicando que quanto maior o teor de vermiculita, maior o nível de isolamento.

Com base nas observações feitas percebem-se ainda dois comportamentos já discutidos anteriormente sobre a condutividade térmica dos materiais. O primeiro diz respeito ao efeito da porosidade sobre a condutividade térmica das placas, ou seja, a incorporação da vermiculita expandida, devido à sua alta porosidade, afeta diretamente a condutividade, uma vez que poros podem ser considerados uma fase de baixa condutividade térmica dispersa na estrutura, pois estão cheios de gás e o mesmo não é bom condutor de calor (SILVA, 2016).

O segundo diz respeito ao efeito da temperatura sobre a condutividade térmica dos materiais. Com a elevação da temperatura, a transmissão de calor por radiação em materiais que não são bons condutores, devido à porosidade, torna-se cada vez mais importante, o que aumenta a condutividade térmica desses materiais (SILVA, 2016). Essa afirmação contribui para justificar a eficácia da vermiculita como isolante térmico, pois mesmo com o aumento da temperatura para 100°C e sabendo-se que a sua adição aumenta a porosidade do material, as placas com vermiculita obtiveram uma menor taxa de aquecimento da placa fria com o tempo quando comparadas com as placas sem vermiculita.

5 CONCLUSÕES

As análises por MEV demonstraram a estrutura tipicamente lamelar da vermiculita, e os efeitos da temperatura e tempo de expansão sobre a morfologia do material esfoliado, com a presença de uma estrutura em flocos. A partir dessa análise, escolheu-se a temperatura de 800°C e o tempo de 10 minutos como os mais indicados para a expansão do material a ser utilizado nas argamassas, pois foram aqueles que demonstraram maior expansão e melhores características.

Analisando-se a densidade aparente de amostras de vermiculita em seu estado natural e expandida à temperatura de 800°C pelo tempo de 10 minutos, percebeu-se o efeito da expansão sobre a diminuição da massa aparente da vermiculita. No entanto, comparando-se os resultados do rendimento volumétrico do processo com os valores encontrados na literatura, esse rendimento foi avaliado como baixo, o que se considera consequência da utilização de amostras de vermiculita superfina.

Com os resultados dos ensaios de DRX demonstrou-se que as amostras do mineral utilizadas neste trabalho são formadas pela mistura de fases mineralógicas interestratificadas de vermiculita com talco. Com a expansão das amostras, ainda foi possível encontrar os picos característicos da vermiculita, mas com a ocorrência de um aumento do espaçamento basal, relacionado à saída de vapor de água da estrutura a elevadas temperaturas, que ocorre de forma explosiva, gerando os flocos expandidos.

Com a análise dos resultados dos ensaios de FRX demonstrou-se a presença de SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ como principais óxidos componentes das amostras do mineral analisado, tanto em sua forma natural quanto expandida, comprovando novamente a natureza das amostras utilizadas neste trabalho.

O resultado do ensaio de DSC demonstrou, a partir de dois eventos térmicos, a eliminação da água adsorvida e água de coordenação presentes no espaço interlamelar quando utilizando uma amostra de material aquecida até a temperatura de 400°C.

A incorporação de vermiculita as argamassas provou afetar as propriedades térmicas e mecânicas das mesmas. Em praticamente todas as composições comparadas, as argamassas contendo vermiculita expandida apresentaram menor condutividade térmica que as argamassas contendo areia em seu lugar. Isso demonstra o efeito isolante esperado com a adição deste material, tornando-o uma boa alternativa para aplicações onde se busca o conforto térmico de edificações. Considerando-se ainda a relação inversamente proporcional

entre condutividade térmica e resistência térmica, pode-se ainda afirmar que as argamassas com a incorporação de vermiculita apresentaram também maior resistividade térmica do que as argamassas de referência com uso de areia.

A adição de vermiculita influenciou significativamente a resistência à compressão das argamassas. Comparando-se com as formulações de referência utilizando-se areia, percebeu-se uma diminuição considerável de resistência mecânica das argamassas quando utilizada a vermiculita, como consequência do efeito negativo da presença de porosidades sobre esta propriedade.

REFERÊNCIAS

- AGUIAR, M. R. M. P.; NOVAES, A. C. Remoção de metais pesados de efluentes industriais por aluminossilicatos. **Química Nova**, vol. 25, n. 6B, 2002, p. 1145-1154.
- AL-HOMOUD, M. S. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. **Building and Environment**, vol. 40, 2005, p. 353-36
- ANDRADE, E. T. *et al.* Determinação das propriedades térmicas de grãos de milho. *Ciências Agrotécnicas*, Lavras, vol. 28, n. 3, 2004, p. 488-498.
- AQUILINO, M. M.; VITTORINO; BARREIRA, F. Térmica. **Téchne**, São Paulo, ed. 76, ano 11, 2003, p.17
- ARAÚJO, P. P. **Caracterização magnética de nanocompósitos à base de vermiculita**. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Física. Universidade de Brasília, Brasília, 2009. 108 p.
- ARMÊNIO MONICO. Disponível em: <<http://armenio-monico.pt/pt/ms/ms/produtos-e-marcas-3105-391-vermoil/ms-90069426-p-4/>>. Acesso em 17 mai. 2016
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de Revestimento de Argamassas**. Rio de Janeiro, 2002. 104 p. Disponível em: <<http://www.comunidade daconstrucao.com.br/upload/ativos/279/anexo/ativosmanu.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13281**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos. Rio de Janeiro, 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas - requisitos. Rio de Janeiro, 2003.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15220**: Desempenho térmico de edificações. Rio de Janeiro, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13529**: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas. Rio de Janeiro, 1995.
- ASTM INTERNATIONAL. **Standard C 168-97**: terminology relating to thermal insulating materials. Pennsylvania, 1997
- ASHRAE. **Standard 55**: Thermal environmental condition for human occupancy. Atlanta, 2004
- BARNHISEL, R.I. & BERTSCH, P.M. Chlorites and hydroxyinterlayered vermiculite and smectite. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., **Minerals in soil environments**. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, 1989. p.729-788
- BARROSO-KRAUSE, C. **Desempenho Térmico e Eficiência Energética em Edificações**. Rio de Janeiro: Procel Edifica, 2011.
- BARSHAD, I. Vermiculite and its relation to biotite as revealed by base exchange reactions, X-ray analyses, differential thermal curves, and water content. **Am. Mineralogist**, v.33, 1948. p. 655-678

BEUTHER, E. **Desenvolvimento de argamassas com adições porosas**. Monografia – Curso de Engenharia de Infraestrutura. Universidade Federal de Santa Catarina, Joinville, 2015. 61 p

BORGES, J. C. S. **Composito de poliuretano de mamona e vermiculita para isolamento térmica**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009. 80 p

BRINDLEY, G.W., BROWN, G. Clay structures of clay minerals and their x-ray identification. **Mineralogical Society**. Londres, v. 5, 1980.

CARLETTO, C. **Subcoberturas: aplicação de isolantes térmicos em sistemas de coberturas**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005. 115 p

CASTRO, O.G. **A vermiculita e suas aplicações**. Relatório Técnico: Aporte Consultores e Associados Ltda. São Paulo, 1996. 54 p.

CINTRA, C. L. D. **Argamassa para revestimento com propriedades termoacústicas, produzida a partir de vermiculita expandida e borracha reciclada de pneus**. Tese (Doutorado) –Programa de Pós- Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2013. 154 p

COUTINHO, A. S. **Conforto e insalubridade térmica em ambiente de trabalho**. 2 ed. João Pessoa: Editora Universitária, 2005.

CURBELO, F. D.S. **Estudoda remoção de óleo em águas produzidas na indústria de petróleo, por adsorção em coluna utilizando a vermiculita expandida e hidrofobizada** Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002. 102 p

ÇENGEL, Y.A. **Heat and mass transfer – A practical approach**. 3 ed. New York: McGraw-Hill, 2007

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral 2015-Vermiculita**. Brasília, 2015.p.116-117. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br/dnpm/sumarios/sumario-mineral-2015/view>>. Acesso em 31 mar. 2016

FRAGA, V. S. **Caracterização Técnico-Econômica dos Principais Minerais Utilizados na Indústria de Petróleo Brasileira**. Dissertação (Mestrado) -Instituto de Geociências. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010. 87 p

FROTA, A. B.; SCHIFFER, S. R. **Manual de conforto térmico**. 7 ed. São Paulo: Studio Nobel, 2003. 243p

GOMES, U. et al. Troca catiônica de metais pesados em água de produção através do argilomineral vermiculita, In: II JORNADA NACIONAL DA PRODUÇÃO CIENTÍFICA EM EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA, 2007, São Luis.

GRIM, R.E. **Clay Mineralogy**. 2. ed. New York: McGraw- Hill, 1968. 596 p

HALLIDAY, D.; WALKER, J.; RESNICK, R. **Fundamentos de Física**, vol. 2, 9 ed. LTC, 2012

JNE REPRESENTAÇÕES. **Vermiculita na construção civil**. Recife, 2016. Disponível em: <<http://www.jnerepresentacoes.com.br/construcaocivil.htm>>. Acesso em: 15 mai. 2016

KREITH, F. **Princípios da transmissão de calor**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1973

LIMA, F. A. M. **Influência da vermiculita expandida na resistência à compressão e reologia de pastas cimentantes de poços de petróleo**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008. 83 p

MARTINS, J., MACHADO, L. C. R., MARCOS, C. e ZACARIAS, C. M. Caracterização tecnológica de vermiculitas brasileiras. In: VI Southern Hemisphere Meeting On Mineral Technology, 2001, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro: CETEM, vol. 3, p. 8-12

MASSARD, H. et al. **Análise das propriedades termofísicas pelo método flash**. Instituto Politécnico, Nova Friburgo, 2004.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Relatório Técnico 48 – Perfil da Vermiculita**. Brasília, 2009. 35 p. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents1138775/1256650/P28_RT48_Perfil_da_Vermiculita.pdf/92473abd-64d9-4001-9937cd0f92db8222>. Acesso em 1 abr. 2016

MUÑOZ, L.S. e CASTELLÓ, J.B.C. Materias Primas y Aditivos Cerámicos, **Enciclopedia Cerámica**, vol. 2, 1 ed. Editora Faenza Ibérica S.I., 2003

NASCIMENTO, M. C. B. **Argamassa térmica produzida com resíduos da exploração e processamento mineral de caulim e vermiculita expandida**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós- Graduação em Engenharia Mineral. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008. 129 p

NOGUEIRA M. C. J. A.; NOGUIERA, J. S. Educação, meio ambiente e conforto térmico: caminhos que se cruzam. **Revista do Mestrado em Educação Ambiental**, vol. 10, 2003. p 104- 108

NTC BRASIL. **Vermiculita expandida**. Disponível em: <<https://www.ntcbrasil.com.br/outros/vermiculita-expandida/>>. Acesso em 15 mai. 2016.

NUNES, E. R. D. **Influência da vermiculita expandida na formulação de pastas leves para evitar a migração de gás em cimentação de postos petrolíferos**. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2014. 101 p

OLIVEIRA, M.P. **Materiais compósitos à base de gesso contendo EVA (etileno acetato de vinila) e vermiculita**. Tese (Doutorado) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2009. 124 p

PESSATTO, V.G.M. **Estudo das argamassas e revestimentos contendo vermiculita**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2005. 212 p.

PORTAL DO CONCRETO. **Cimento**. Disponível em: <<http://www.portaldoconcreto.com.br/cimento/concreto/cimento.html>>. Acesso em 17 mai 2016.

QUARCIONI, V.A. Estimativa da porosidade de argamassas de cimento e cal pelo método de cálculo de volumes. **Ambiente Construído**. Porto Alegre, v. 9, n. 4, 2009, p. 175-187.

REFRÁTIL. **Vermiculita Expandida**. Disponível em: <<http://www.refratil.com.br/produto/vermiculita-expandida>>. Acesso em 12 abr. 2016

REIS, E. **Vermiculita no Brasil – Situação atual**. Ministério de Ciência e Tecnologia/Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE). Brasília, 2002. Disponível em: <<https://www.finep.gov.br/images/a-finep/fontes-de-orcamento/fundos-setoriais/ct-mineral/vermiculita-no-brasil.pdf>>. Acesso em : 1 abr. 2016

ROMAN, H. R. **Revestimentos de Argamassa**. Florianópolis, 2014. 19 slides, color. Disponível em: <<http://www.npc.ufsc.br/gda/humberto/09.pdf>>. Acesso em: 24 abr.2016.

SANTOS, P.S. **Tecnologia das argilas aplicadas às argilas brasileiras**, vol. 2. São Paulo: Edgard Blucher LTDA, 1975. 802 p.

SANTOS, P.S. e NAVAJAS, R. Estudos sobre piroexpansão de vermiculitas brasileiras- Uma revisão. **Cerâmica**. vol .27, n. 1, 1981, p. 423-444.

SANTOS, W.N. O método de fio quente: técnica em paralelo e técnica de superfície. **Cerâmica**, vol. 48, n. 306, 2012, p. 86-91.

SANTOS, R. F. **A arquitetura e a eficiência nos usos finais de energia para o conforto ambiental**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. 87 p.

SILVA, A.G.P. **Estrutura e Propriedades de Materiais Cerâmicos-Propriedades Térmicas**. Disponível em: <<http://aulas.e-agps.info/ceramicos1/CAPITULO%20VIII%20VF.pdf>>. Acesso em 20 nov. 2016

SILVEIRA, D. M. da. **Adsorção de um ácido graxo utilizado em flotação por vermiculita hidrofóbica**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005. 181p.

SIMIONI, W.S. Análise de erros na medição de condutividade térmica de materiais através do método fluximétrico. (Dissertação) – Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005. 116 p.

SOUSA, V. A. L. **Estudo do comportamento de materiais não convencionais utilizados como revestimento de paredes, visando à redução de carga térmica**. Dissertação (Mestrado) - Engenharia de Produção. Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2012.129 p.

TANNER, A. O. **2014 Minerals yearbook: vermiculite**. U.S Geological Survey, 2014. Disponível em : < <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/vermiculite/>>. Acesso em: 31 mar. 2016

TSIRAMBIDES, A.; MICHAELILLIS, K.. An X-ray, EPMA, and oxygen isotope study ofvermiculitized micas in the ultramafic rocks at Askos, Macedonia, Greece. **Applied Clay Science**, n.14, 1999, p.121-140.

UGARTE, J. F. O., MONTE, M. B. M., FRANÇA, S. C. A. e GRACIANO, F. P. R. (2004). Comparação estatística do fator de expansão de concentrados de vermiculita. In: XX Encontro

Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 2004, Florianópolis. **Anais...** vol. 1 p. 201-208.

UGARTE, J. F. O. *et al.* **Rochas & minerais industriais – usos e especificações**. 2. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. p 865 - 887.

VALDIVIEZO, E.V., SOUZA, M.M. Avaliação de propriedades de esfoliação térmica das vermiculitas do nordeste brasileiro. In: II SIMPÓSIO DE MINERAIS INDUSTRIAIS DO NORDESTE, 2010, Campina Grande. **Anais eletrônicos...** Rio de Janeiro: CETEM, 2010. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/handle/cetem/1275/Part%204.6%20anais_segundo_simposio_minerais_industriais_do_nordeste.pdf?sequence=1>. Acesso em: 16 abr. 2016.

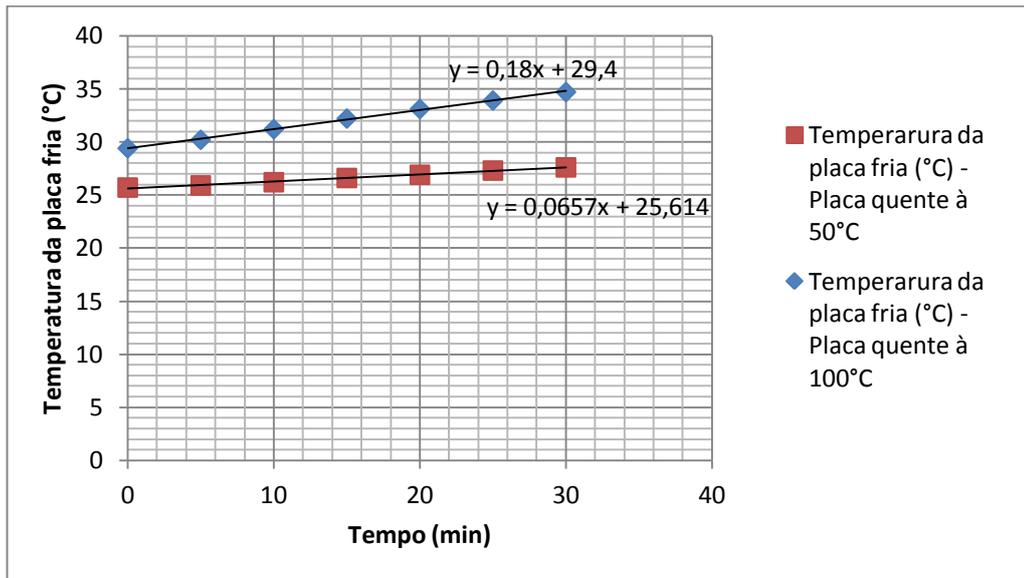
VECCHIA, F. **Comportamento térmico de sistemas de cobertura**. vol. 1, 1 ed. São Paulo: Eternit S., 2003. 74 p.

WEISS, E.J.; ROWLAND, R.A. Effect of heat on vermiculite and mixed-layered vermiculite-chlorite. **American Mineral**, vol. 46, 1956. p. 899-914

APÊNDICE A: GRÁFICOS DE VARIAÇÃO DE TEMPERATURA NO TEMPO

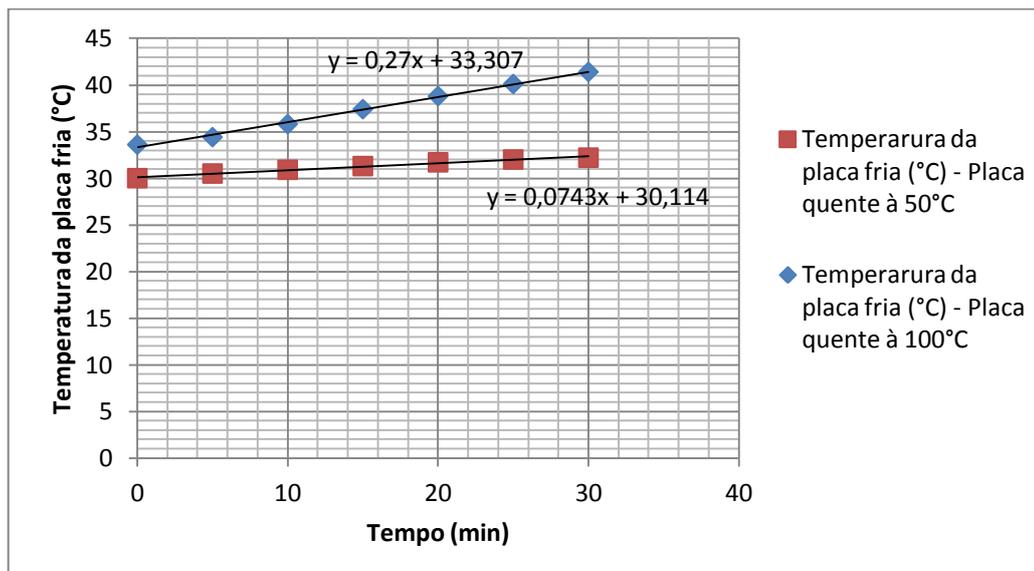
Os gráficos de variação de temperatura no tempo para a placa fria utilizados para o cálculo da taxa de variação de temperatura no tempo utilizados neste trabalho, são mostrados à seguir, nas Figuras A-1 a A-6.

Figura A- 1 – Variação da temperatura na placa fria (Amostra 3:1:1)



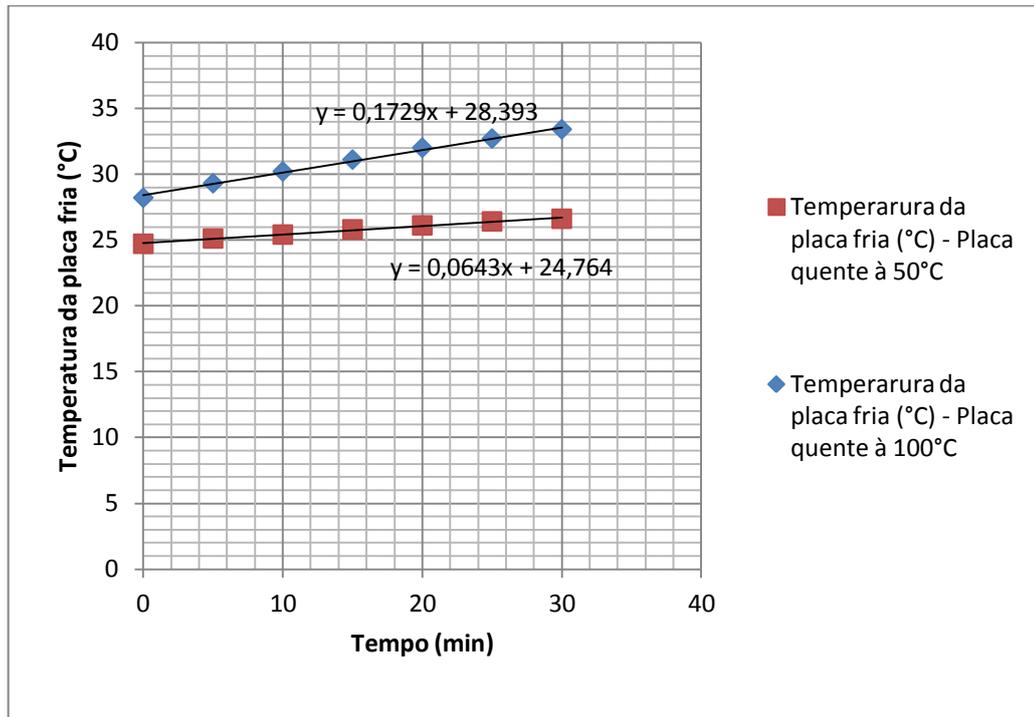
Fonte: Produzido pela autora.

Figura A- 2 – Variação da temperatura na placa fria (Amostra 4:1:1)



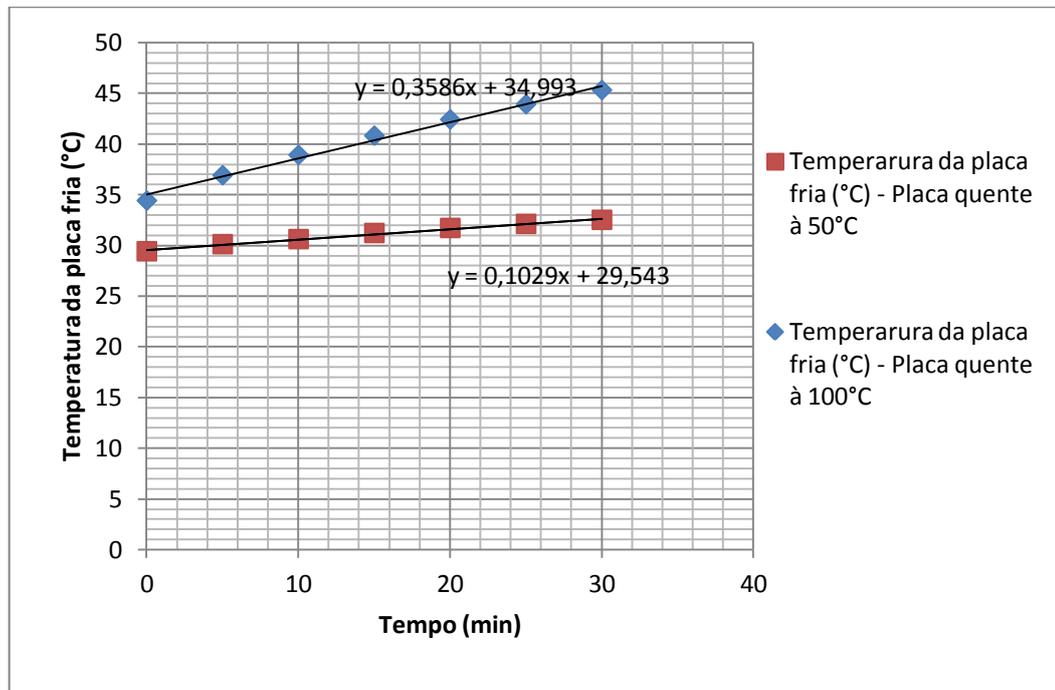
Fonte: Produzido pela autora.

Figura A- 3 – Variação da temperatura na placa fria (Amostra 3:1:1 -Vermiculita)



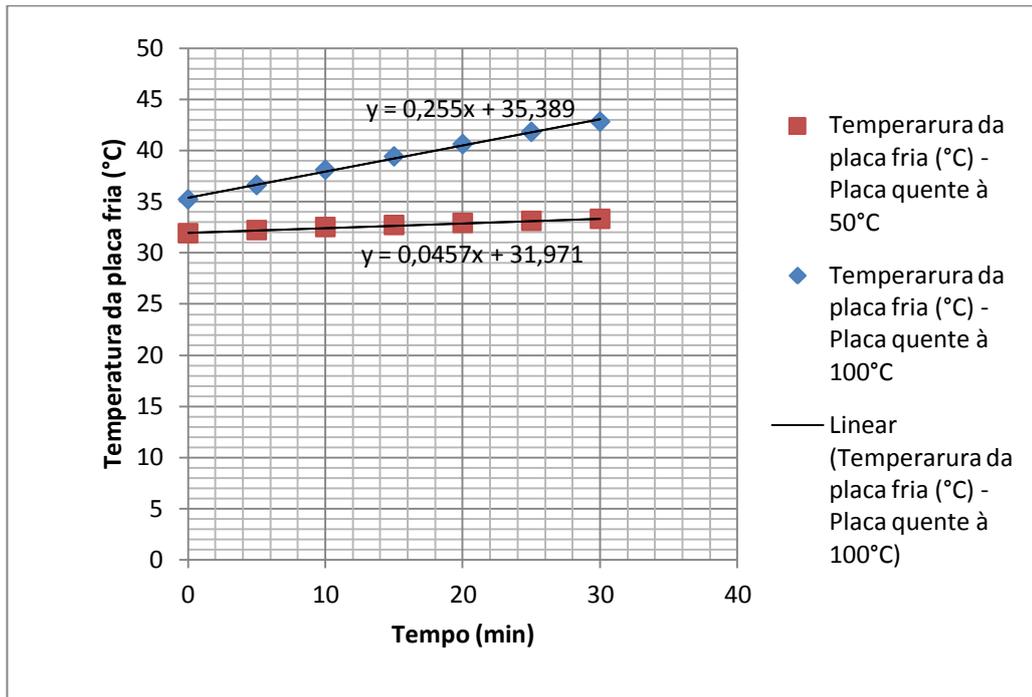
Fonte: Produzido pela autora

Figura A- 4 – Variação da temperatura na placa fria (Amostra 3:1:1 - Areia)



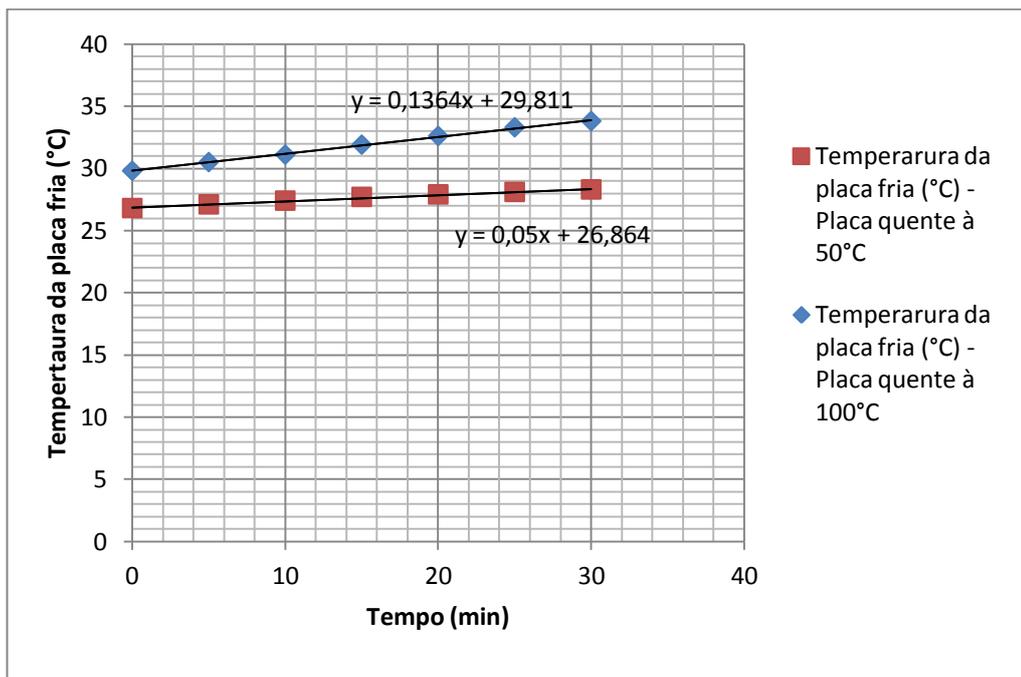
Fonte: Produzido pela autora

Figura A- 5 –Variação da temperatura na placa fria (Amostra 5:1 - Vermiculita)



Fonte: Produzido pela autora

Figura A- 6 – Variação da temperatura na placa fria (Amostra 5:1 - Areia)



Fonte: Produzido pela autora