



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO CONSTRUÇÕES RURAIS E AMBIÊNCIA



**DESEMPENHO TERMOMECÂNICO DE ARGAMASSAS COM
ADIÇÃO DE RESÍDUOS DE VERMICULITA PARA
CONSTRUÇÕES RURAIS**

Renata Tomaz Vieira Dias

Campina Grande - PB

2018

**DESEMPENHO TERMOMECÂNICO DE ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE
RESÍDUOS DE VERMICULITA PARA CONSTRUÇÕES RURAIS**

Renata Tomaz Vieira Dias

Orientador: Prof. Dr. José Pinheiro Lopes Neto

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção da titulação como Mestre (a) em Engenharia Agrícola, na área de Construções Rurais e Ambiente.

Campina Grande, PB.

2018

Renata Tomaz Vieira Dias

**DESEMPENHO TERMOMECÂNICO DE ARGAMASSAS COM ADIÇÃO DE
RESÍDUOS DE VERMICULITA PARA CONSTRUÇÕES RURAIS**

Aprovado em: ____ de _____ de ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. José Pinheiro Lopes Neto
Orientador – UFCG/UEAg

Prof. Dr. José Wallace Barbosa do Nascimento
Examinador Interno – UFCG/UEAg

Profa. Dra. Maria Luiza Souza Resende
Examinador Interno – UFCG/UAEM/UAEPetro

Profa. Dra. Fernanda Fernandes de Melo Lopes
Examinador Externo – UFPB/CCA

DEDICO

À meus avós Breno (*in memorian*), Cal (*in memorian*) e Carminha (*in memorian*) pela saudade deixada em meu coração e ao Vô Constante pelo grande orgulho em poder presenciar este momento ao seu lado; À meu Pai Arlindo por ensinar que através do conhecimento se alcança todos os sonhos e à minha Mãe Gessirami por cada palavra de sabedoria e amor.

AGRADECIMENTOS

Faz-se necessário agradecer nominalmente aqueles que, de forma indireta ou indireta, participaram e contribuíram na elaboração desta dissertação. Diante disso, declaro aqui os meus mais sinceros agradecimentos:

Primeiramente, a Deus que com a sua bondade e misericórdia derramou bênçãos sobre a minha vida;

Ao meu orientador José Pinheiro Lopes Neto pela orientação, ensinamentos, compreensão, paciência e todo o apoio dado para realização desta dissertação;

A todos os professores que compõem a área de Construções Rurais e Ambiente, por todo o conhecimento passado a mim durante as aulas ministradas;

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico), pela bolsa de estudos concedida;

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola – PPGEA/ UFCG, pela realização deste curso de mestrado;

Ao Laboratório de Construções Rurais e Ambiente, pela disponibilização da estrutura laboratorial para executar ensaios, juntamente com o técnico laboratorial Joselito pela ajuda durante todo o experimento e técnico laboratorial em eletrônica Thiago por toda gentileza e colaboração;

Aos meus pais e familiares pelo incentivo, suporte e apoio no caminho que escolhi trilhar;

Aos amigos do mestrado pelas sugestões, empenho e ajuda depositada para realização desta pesquisa, além dos bons momentos de descontração que tornaram o dia a dia mais leve.

Dias, Renata Tomaz Vieira. Desempenho termomecânico de argamassas com adição de resíduos de vermiculita para construções rurais, 2018. 75f. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambientação) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

RESUMO: No estado da Paraíba há significativa concentração do mineral vermiculita que, através da sua extração, gera matérias primas para construção civil. Durante seu beneficiamento, toneladas de resíduos são gerados e depositados no meio ambiente de forma inadequada, causando grandes impactos ambientais. Diante disto, esse trabalho teve como objetivo analisar a viabilidade do uso do resíduo de vermiculita em substituição a porção de areia fina natural na elaboração de argamassas de revestimento com propriedades melhoradas. Foram coletadas amostras de resíduo de vermiculita na mineradora Pedra Lavrada, Santa Luzia/PB, para realização de testes de caracterização, buscando avaliar a sua aplicação em argamassas. Foram preparadas argamassas com traço 1:4 (cimento: areia), com teores de substituição de areia fina por resíduo de 0%, 30%, 60% e 100%. Empregou-se o cimento Portland CP II-Z 32, com fator água/cimento entre 0,65 e 0,85. As argamassas foram analisadas no estado endurecido através dos ensaios de resistência à compressão, absorção por imersão e por capilaridade. Diante do melhor resultado encontrado, foram confeccionadas placas para o teste do comportamento térmico. A caracterização do resíduo de vermiculita mostrou uma grande quantidade de finos o que acarretou em melhoria na resistência à compressão, absorção de água por imersão e capilaridade nas argamassas, quando comparada a argamassa de referência (0%). Os resultados da análise de comportamento térmico, obtidos por meio do gradiente térmico entre as faces das placas, aparentaram variação no gradiente térmico de até 40% superior para as placas que continham resíduo de vermiculita quando comparado aos resultados obtidos na argamassa de referência (0%). Com isso, é possível concluir que o resíduo de vermiculita é apropriado para fabricação de argamassas de revestimento e garante propriedades melhoradas, principalmente quanto ao seu comportamento térmico em comparação a argamassa de referência.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduo mineral; agregado alternativo; aproveitamento de rejeitos; compósito cimentício; resistência; comportamento térmico.

Dias, Renata Tomaz Vieira. Desempenho termomecânico de argamassas com adição de resíduos de vermiculita para construções rurais, 2018. 75f. Dissertação (Mestrado em Construções Rurais e Ambientação) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2018.

ABSTRACT: In the state of Paraíba there is a significant concentration of the vermiculite mineral that, through its extraction, generates raw materials for civil construction. During its processing, tons of waste are generated and deposited in the environment in an inadequate way, causing great environmental impacts. The objective of this work was to analyze the feasibility of the use of the vermiculite residue in substitution for the portion of natural fine sand in the elaboration of coating mortars with improved properties. Samples of vermiculite residue were collected at Pedra Lavrada, Santa Luzia / PB, to perform characterization tests, in order to evaluate their application in mortars. Mortars with 1: 4 traces (cement: sand) were prepared, with substitution contents of 0%, 30%, 60% and 100% fine sand. Portland cement CP II-Z 32, with water / cement factor between 0.65 and 0.85, was used. The mortars were analyzed in the hardened state through the tests of resistance to compression, immersion absorption and capillarity. Considering the best result found, plates were prepared for the thermal behavior test. The characterization of the vermiculite residue showed a great amount of fines, which led to an improvement in the compressive strength, water absorption by immersion and capillarity in the mortar, when compared to the reference mortar (0%). The results of the thermal behavior analysis, obtained by means of the thermal gradient between the faces of the plates, showed a variation in the thermal gradient of up to 40% higher for the plates containing vermiculite residue when compared to the results obtained in the reference mortar (0%). Thus, it is possible to conclude that the vermiculite residue is suitable for the production of coating mortar and guarantees improved properties, mainly in terms of its thermal behavior compared to the reference mortar.

KEY-WORDS: Mineral residue; alternative aggregate; use of tailings; composite cement; resistance; thermal behavior.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Vermiculita	21
Figura 2 - Porcentagem de produção de vermiculita relacionada à produção mundial total em 2015	23
Figura 3 - Imagens de amostras de vermiculita (Santa Luzia, PB): (a) vermiculita natural; (b) vermiculita expandida.....	24
Figura 4 - Expansão das áreas impactadas no pátio operacional em 2011.....	28
Figura 5 - Expansão das áreas impactadas no pátio operacional em 2013.....	28
Figura 6 - A energia que flui em um edifício típico: produzido no interior (vermelho), perdas de calor (azul) e fluxos de energia que entram do exterior (amarelo)	37
Figura 7 - Fluxograma com etapas do experimento	38
Figura 8 - (a)Aspecto resíduo de vermiculita; (b) Material descartado dentro da Mineradora Pedra Lavrada Ltda (MPL).	39
Figura 9 – (a) Serie de peneiras; (b) Mesa vibratória.....	40
Figura 10 - Ensaio de determinação da massa unitária, (a) resíduo de vermiculita e (b) areia natural.	41
Figura 11 - Ensaio de determinação da massa específica e massa específica aparente, (a1 e a2)) resíduo de vermiculita e (b1 e b2) areia natural	41
Figura 12 - Ensaio de determinação da absorção do resíduo de vermiculita (a) e areia natural (b)	42
Figura 13 – (a) Montagem dos corpos-de-prova; (b) Moldagem das argamassas nos corpos-de-prova; (c) Moldagem das argamassas finalizadas	44
Figura 14 – (a) Equipamento com corpo-de-prova; (b) Corpo-de-prova rompido em equipamento	45
Figura 15 - Ensaio de absorção de água por imersão	47
Figura 16 - Ensaio de absorção de água por capilaridade	47
Figura 17 - Arduino utilizado no programa experimental de instrumentação.....	49
Figura 18 - Sensor utilizado no programa experimental de instrumentação	49
Figura 19 - Termostato utilizado no programa experimental de instrumentação.....	49
Figura 20 - Fluxograma do sistema de instrumentação acoplado as demais partes constituintes.....	50
Figura 21 – Placa de argamassa, (a) Molde; (b) Moldagem; (c) Placa	50

Figura 22 - Identificação da localização de instalações dos sensores na placa de argamassa.....	51
Figura 23 – Sistema de fixação dos sensores na placa de argamassa.....	51
Figura 24 - Vista frontal e perspectiva do protótipo.....	52
Figura 25 - Vista frontal e perspectiva do protótipo com placa de argamassa.....	52
Figura 26 - Vista frontal e perspectiva do protótipo com placa de argamassa e fechamento isopor.....	52
Figura 27 - Resistência a compressão de argamassas em diferentes dias de cura.....	58
Figura 28 – Absorção de água por imersão de argamassas em diferentes dias de cura	62
Figura 29 - Absorção de água por capilaridade de argamassas em diferentes dias de cura	64
Figura 30 - Comportamento das curvas de temperatura apresentados pelas placas de argamassa.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação da vermiculita.....	26
Tabela 2 - Área impactada no pátio operacional	27
Tabela 3 - Traço, composição e proporções do resíduo utilizado no experimento.	43
Tabela 4 - Coeficiente d2.....	46
Tabela 5 - Avaliação da eficiência do ensaio	46
Tabela 6 - Caracterização granulométrica do resíduo de vermiculita e da areia.....	55
Tabela 7 - Massa Unitária e Específica do resíduo de vermiculita e da areia	56
Tabela 8 - Absorção de água do resíduo de vermiculita e da areia	56
Tabela 9 - Coeficiente de inchamento do resíduo de vermiculita	57
Tabela 10 - Resistência à compressão das argamssas em diferentes dias de cura.....	59
Tabela 11 - Exigências mecânicas descritas na NBR 13281	60
Tabela 12 - Eficiência do ensaio de resistência à compressão	61
Tabela 13 - Absorção de água por imersão das argamssas em diferentes dias de cura. 62	
Tabela 14 - Absorção de água por capilaridade das argamssas em diferentes dias de cura	64
Tabela 15 – Gradientes térmicos (máximos e mínimos) das placas de argamassa	67

SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Normas Brasileiras
PIB	Produto interno bruto
DNPM	Departamento Nacional de Produção Mineral
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
UNESP	Universidade Estadual Paulista
MPL	Mineradora Pedra Lavrada
US\$	Dólar americano
°C	Grau Celsius
A	Área
mm	Milímetro
m	Metro
m ²	Metro quadrado
Kg	Quilograma
Kg/ m ³	Quilograma por metro cubico
g/ cm ²	Gramas por centímetro quadrado
g/ cm ³	Gramas por centímetro cubico
Kj/ (Kg.K)	Quilo Joule por quilograma Kelvin
MPa	Mega Pascal
W/ m.K	Watts por metro Kelvin
W/ m ² .K	Watts por metro quadrado Kelvin
ACR	Argamassa de referência
AC30	Argamassa com 30% de teor de substituição
AC60	Argamassa com 60% de teor de substituição
AC100	Argamassa com 100% de teor de substituição
PACR	Placa de argamassa de referência
PAC60	Placa de argamassa com 60% de teor de substituição
Δmáx	Gradientes médio de temperatura máxima
Δmín	Gradientes médio de temperatura mínima

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	14
1.1.	OBJETIVOS	15
1.1.1.	Objetivo geral	15
1.1.2.	Objetivos específicos	15
2.	REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1.	Desenvolvimento sustentável	16
2.1.1.	Logística reversa.....	16
2.1.2.	Reciclagem	17
2.2.	Mineração	18
2.3.	Resíduos.....	19
2.3.1.	Sólidos	19
2.3.2.	Minerais	19
2.4.	Impactos ambientais	20
2.5.	Vermiculita	21
2.5.1.	Mineralogia e geologia	22
2.5.2.	Produção	23
2.5.3.	Aplicações.....	24
2.5.4.	Jazidas.....	25
2.5.5.	Resíduos.....	27
2.6.	Argamassa.....	28
2.6.1.	Definições e aplicações.....	28
2.6.2.	Função das argamassas	29
2.6.3.	Propriedades das argamassas no estado fresco	30
2.6.4.	Propriedades das argamassas no estado endurecido	32
2.6.5.	Argamassa com resíduos minerais.....	34
2.7.	Comportamento térmico	36
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	38
3.1.	Coleta do resíduo	39
3.2.	Caracterização dos materiais para produção das argamassas	39

3.2.1.	Distribuição granulométrica do resíduo de vermiculita e da areia natural	39
3.2.2.	Ensaio de massa unitária do resíduo de vermiculita e da areia natural.....	40
3.2.3.	Ensaio de massa específica do resíduo de vermiculita e da areia natural.....	41
3.2.4.	Ensaio de absorção de água do resíduo de vermiculita e da areia natural.....	41
3.2.5.	Ensaio do coeficiente de inchamento do resíduo de vermiculita.....	42
3.2.6.	Aglomerante	42
3.2.7.	Água.....	42
3.3.	Procedimento experimental	43
3.4.	Produção das argamassas.....	44
3.5.	Caracterização das propriedades das argamassas	44
3.5.1.	Resistência à compressão	44
3.5.2	Absorção de água por imersão.....	46
3.5.3	Absorção de água por capilaridade.....	47
3.6.	Análise estatística das propriedades das argamassas.....	47
3.7.	Avaliação do comportamento térmico das argamassas	48
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1.	Ensaio preliminares de caracterização dos materiais	55
4.1.1.	Distribuição granulométrica do resíduo de vermiculita e da areia natural	55
4.1.2.	Massa unitária e massa específica do resíduo de vermiculita e areia natural	56
4.1.3.	Absorção de água do resíduo de vermiculita e areia natural	56
4.1.4.	Inchamento do resíduo de vermiculita.....	57
4.2.	Ensaio das argamassas no estado endurecido	58
4.2.1.	Resistência à compressão	58
4.2.2.	Absorção de água por imersão.....	61
4.2.3.	Absorção de água por capilaridade.....	64
4.3.	Comportamento térmico das placas de argamassa	66
5.	CONCLUSÃO.....	69
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é um dos países de grande destaque no cenário mundial devido ao seu patrimônio, exportação e produção de insumos, por meio da extração dos minérios, que geram matérias-primas para as industriais, principalmente no setor de construção.

O estado da Paraíba representa o segundo lugar (19,1%) na classificação Brasileira dos estados quanto à reserva mineral de vermiculita no país. Sua produção beneficiada corresponde à aproximadamente 1,13 toneladas anualmente. Na região semiárida do estado da Paraíba, mais especificamente no município de Santa Luzia, se concentra uma das atividades de maior expressão econômica da região, que dentre os principais usos na construção civil, está a sua utilização como isolante térmico e acústico, quando expandida. Tendo por contrapartida, após o beneficiamento, a geração de um passivo ambiental que se caracteriza por um produto de partículas muito finas, sem aplicação econômica, e que, na mineradora MPL especificamente, chega a mais de 12.000 Kg por ano, que são acumulados nos pátios e lugares impróprios como as margens das rodovias e estradas vicinais, entre outros.

Atualmente a disputa no mercado industrial não admite que empresas negligenciem o desperdício de materiais, principalmente quanto aos problemas de contaminação do meio ambiente, que tendem a comprometer gerações futuras, sendo necessárias transformações no sistema produtivo e aplicações dos resíduos gerados.

Na busca por melhorias dos materiais de construção e redução dos impactos ambientais, empresas tem investido nas diferentes possibilidades de substituir materiais convencionais por resíduos industriais. Como exemplo, o resíduo de vermiculita se apresenta como uma forma viável de tentar promover melhorias nas propriedades mecânicas e térmicas de novos materiais, bem como redução das áreas impactadas.

Por tanto, o presente estudo apresenta relevância para o setor de materiais de construção, por desenvolver uma pesquisa sobre um novo material com propriedades (resistência, absorção de água e comportamento térmico) melhoradas, além de grande importância para o meio ambiente, pois surge como alternativa para a aplicabilidade do resíduo de vermiculita, que atualmente não tem nenhuma utilização e que compromete a preservação ambiental e conseqüentemente a população e a economia.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo geral

Avaliar o desempenho termomecânico de argamassa com adição de resíduo de vermiculita para construções rurais.

1.1.2. Objetivos específicos

- Determinar as propriedades físicas do resíduo de vermiculita e da areia natural;
- Determinar as propriedades físicas e mecânicas da argamassa produzida com diferentes teores de substituição da areia natural por resíduo de vermiculita;
- Avaliar o gradiente térmico entre as faces das placas de argamassa propostas tomando como referência a argamassa sem resíduo.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Desenvolvimento sustentável

Segundo Ribeiro et al. (2016), sustentabilidade é uma forma de conscientizar a população sobre a importância da preservação do meio ambiente, mantendo um processo de produção eficiente com responsabilidade ambiental. Ainda complementa definindo sustentabilidade como um processo o qual as empresas estão buscando implantar com o intuito de suprir suas necessidades financeiras, contribuindo para um desenvolvimento saudável do meio ambiente. Ou seja, a sustentabilidade empresarial é ser socialmente responsável por considerar a premissa de que o crescimento econômico representado na geração de riquezas é uma contribuição que as empresas devem oferecer à sociedade.

Diante do crescimento populacional e empresarial, houve um considerável desenvolvimento do setor da construção, que se caracterizou como grande gerador de resíduos do país. Fatores como a falta de informação da população e das empresas sobre o modo correto de descartar os resíduos contribuí drasticamente para o aumento dos impactos ambientais. Com o aumento dos problemas ambientais gerados pelo crescimento desordenado nas últimas décadas, os consumidores ficaram mais conscientes da importância da defesa do meio ambiente e cada vez mais buscam por produtos e serviços de empresas sustentáveis. Vale a pena ressaltar que, sustentabilidade empresarial não é atitudes superficiais que visem o marketing, aproveitando a chamada “onda ambiental”, devem apresentar resultados práticos e significativos para o meio ambiente e a sociedade como um todo (Ribeiro et al., 2016).

2.1.1. Logística reversa

Com base nesse pensamento citado anteriormente, Ribeiro et al. (2016), ainda explicam que foi elaborado um conjunto de ações, mais conhecido por logística reversa, que tem como intuito viabilizar o retorno de produtos para seu ciclo produtivo, por meio de canais de pós-venda e pós-consumo, ocasionando a redução dos impactos ambientais e consequentemente melhorando a imagem das empresas perante a sociedade.

Diante desse contexto, é de grande importância a preocupação das empresas em reutilizar ou reciclar resíduos, pois proporcionaria uma redução significativa nos

impactos ambientais, por meio da minimização do uso de recursos naturais. Maneiras de alcançar esses objetivos seriam investir nas formas de reaproveitar e reutilizar resíduos, que podem ser transformados em agregados reciclados por meio do processo de reciclagem, dando origem a outros materiais (Ribeiro et al., 2016).

2.1.2. Reciclagem

Rufino e Galdino (2015), explicam que a grande disputa por mercado não admite mais que empresas negligenciem questões como desperdício de materiais, gestão ineficiente dos processos de produção e, mais recentemente, a emissão, controle e reciclagem dos seus resíduos. A consagração do processo de reciclagem dentro da própria indústria (como por exemplo, na fabricação de ferro fundido), bem como a incorporação de resíduos como areia de fundição e escória na construção civil, transformou definitivamente a questão de gerenciamento e reaproveitamento de subprodutos muito importantes. Atualmente esta questão tem enorme importância para o desenvolvimento sustentável, que procura satisfazer as necessidades da geração atual, sem comprometer as gerações futuras. Atingindo uma condição aceitável de desenvolvimento social, econômico e de realização humana que preserve os recursos da terra, mantendo as funções e componentes do ecossistema equilibrados, para manter uma adequada condição de vida para as pessoas e outros seres vivos.

Os autores, citados anteriormente, ainda ressaltam que um fator importante no incentivo da reciclagem dos resíduos industriais é evitar problemas de contaminação e degradação do meio ambiente em função da natureza dos resíduos, em especial os resíduos sólidos. Estes podem gerar danos na atmosfera, solo, lençol freático e rios, durante todo seu ciclo de vida, seja nas dependências da empresa ou no seu destino final. Resíduos de produtos químicos, subprodutos sólidos da indústria siderúrgica, resíduo do corte de pedras ornamentais, resíduos de demolições entre outros se enquadram nesta situação.

Impedir a geração de resíduos mediante a proibição de produzir ou de consumir é, no entanto, uma alternativa quase sempre falsa, que conduz a outros tipos de problemas: pobreza, desemprego e deslocamento da produção para outras regiões. O que se coloca às indústrias é a busca de novas tecnologias, a racionalização na utilização de recursos eliminando ou reduzindo perdas, fugas, o aperfeiçoamento do sistema produtivo (eco eficiência) e sua integração interna e externa para efetivar as

transformações necessárias ao atual ambiente de negócios (Valle, 2012, apud Rufino e Galdino, 2015).

Desta forma, novos produtos podem ser criados e suas propriedades garantidas junto as normas estabelecidas pela ABNT. Além disso, o material alternativo tem que apresentar um custo final reduzido para que possa competir com os materiais utilizados atualmente. Esses são alguns dos desafios encontrados no caminho de quem investe em pesquisas para se reciclar algum material. Como existe uma infinidade de possibilidades para a utilização de um resíduo, é indicado que se trabalhe seguindo alguns parâmetros já estabelecidos, buscando alternativas já estudadas por outros pesquisadores (Rufino e Galdino, 2015).

Portanto, é necessário apontar a importância e os benefícios gerados pela reutilização e reciclagem dos resíduos que poderá acarretar ganhos ambientais, sociais e econômicos. Além de uma constante melhora no desenvolvimento ambiental e industrial, proporcionando bem-estar à saúde humana (Ribeiro et al., 2016).

2.2. Mineração

Nos últimos tempos, a América Latina tem focado a atenção mundial para sua produção mineral, recebendo 27% do total de investimentos em exploração, segundo o Banco Mundial. O órgão afirma que um só país, o Chile, recebeu dividendos da mineração da ordem de US\$41 bilhões (R\$ 155,8 bilhões) em 2011, ou 19% de seu Produto Interno Bruto (PIB). O Peru recebeu US\$17 bilhões e a Bolívia, US\$ 1,3 bilhão. No Brasil, por exemplo, a receita gerada pela mineração alcançou US\$67 bilhões, ou 3% do PIB. A expectativa é que os investimentos continuem até pelo menos 2020, é o que o Banco Mundial espera mesmo com esta desaceleração na economia (Fajardo, 2015).

O Brasil detém um enorme patrimônio mineral, sendo um dos maiores produtores e exportadores de minérios do mundo. Produz 72 substâncias minerais, das quais 23 são metálicas, 45, não-metálicas e 4, energéticas. Em 2013, os registros oficiais do valor da Produção Mineral Brasileira (sem petróleo) foram de US\$ 42 bilhões (Araújo et al., 2014).

No que diz respeito à exportação de bens minerais, O IBRAM (2014), relata que o Brasil apresenta um importante papel no cenário global, pois é um dos maiores exportadores de diversos bens minerais, dentre eles nióbio, minério de ferro, manganês,

tantalita, grafite, bauxita e rochas ornamentais. Também se destaca na produção de rochas ornamentais e de revestimento, fosfato, talco, vermiculita e estanho, dentre outros minérios (DNPM, 2012). Alguns dados do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, referentes à distribuição das exportações e importações brasileiras para 2011 revelaram que a exportação de bens minerais constitui mais que o dobro do percentual das importações minerais (IBRAM, 2014).

A indústria extrativa mineral (sem petróleo) também gera um efeito multiplicador na economia, tanto na produção como no emprego, pois os bens que extrai fornecem insumos tanto para a indústria de transformação quanto para o setor de construção, e os seus empreendimentos geram, na sua esfera de influência, um amplo conjunto de atividades conexas de bens e serviços. Como parâmetro, os autores citam que a mineração no Brasil gera emprego direto para 175 mil trabalhadores, valores subavaliados porque a mineração no Brasil tem forte informalidade produtiva (Araújo et al., 2014).

2.3. Resíduos

2.3.1. Sólidos

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010, define resíduos sólidos como material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido. Além de descrever rejeitos como resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada. Esta política vale-se dos princípios da ecologia industrial e coloca entre seus principais objetivos a não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos (PNRS, 2012).

2.3.2. Minerais

A lei 12.305 define resíduos de mineração como aqueles gerados na atividade de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios (PNRS, 2012). Porém a quantificação do volume desses resíduos é difícil devido a complexibilidade e a diversidades das operações e das tecnologias utilizadas nesses processos (Silva et al., 2012).

Na atividade de mineração, grandes volumes e massas de materiais são extraídos e movimentados. A quantidade de resíduos gerada pela atividade depende do processo utilizado para extração do minério, da concentração da substância mineral estocada na rocha matriz e da localização da jazida em relação à superfície. Na atividade de mineração, existem dois tipos principais de resíduos sólidos: os estéreis e os rejeitos. Os estéreis são os materiais escavados, gerados pelas atividades de extração (ou lavra) no decapeamento da mina, não têm valor econômico e ficam geralmente dispostos em pilhas. Os rejeitos são resíduos resultantes dos processos de beneficiamento a que são submetidas às substâncias minerais. Estes processos têm a finalidade de padronizar o tamanho dos fragmentos, remover minerais associados sem valor econômico e aumentar a qualidade, pureza ou teor do produto final (Silva et al., 2012).

2.4. Impactos ambientais

A mineração, evidentemente, causa um impacto ambiental considerável. Ela altera intensamente a área minerada e as áreas vizinhas, onde são feitos os depósitos de estéril e de rejeito. Além do mais, quando temos a presença de substâncias químicas nocivas na fase de beneficiamento do minério, isto pode significar um problema sério do ponto de vista ambiental (Kageiama et al., 2003, apud Alencar et al., 2015).

Na região semiárida da Paraíba uma das atividades de maior expressão econômica é a mineração, gerando renda para população local e recursos para o estado, tendo por contrapartida a geração de passivos ambientais, que se torna um ato comum entre as mineradoras, durante a lavra produzir rejeitos biologicamente inativos, que são acumulados nos pátios, e lugares impróprios como as margens das rodovias e estradas vicinais, entre outros. Isso acontece frequentemente devido à desvantagem econômica no reaproveitamento do rejeito da matéria prima, e também aos custos adicionais com o seu transporte, gerando assim, sobre a responsabilidade da mineradora, passivos ambientais a serem recuperados (EMBRAPA, 2008).

Além de todos os impactos citados anteriormente Alencar et al. (2015), expõem em seus estudo que outro problema é a forma de extração do minério, que é feita com a

remoção da camada superficial do solo e que durante o processo de extração, altera a paisagem, resultando em crateras que deformam o solo-paisagem, tornando-se um grande problema para o meio ambiente, para os empreendimentos, e para a sociedade, ficando sob a responsabilidade da mineradora, a função de evitá-los e mesmo depois de gerados revertê-los.

Santos (2015) afirma que em todas as etapas do ciclo de vida, é necessário desenvolver e implantar mecanismos para evitar impactos ambientais, limitar o uso de substâncias perigosas e o desperdício de matéria e energia. A vida útil de um bem de consumo é limitada, sendo a maioria dos produtos, descartada como resíduos. O destino final de muitos produtos é o meio ambiente e de forma inadequada.

Laurent et al. (2014), apresentam que a visão tradicional de se considerar os resíduos como poluição vem progressivamente mudando para uma nova perspectiva na qual os resíduos são considerados como um recurso que poderão ajudar a sociedade a se tornar mais sustentável.

2.5. Vermiculita

França et al. (2016), relatam que vermiculita (Figura 1) é um mineral industrial encontrado em vários países como Austrália, Brasil, Bulgária, China, Rússia, África do Sul, Uganda, Estados Unidos e Zimbábue, que também são os principais produtores mundiais. Vermiculita é o nome geológico dado a um grupo de minerais laminares hidratados que são silicatos de alumínio-ferro-magnésio, assemelhando-se a mica em aparência.

Figura 1 - Vermiculita



Fonte: Rashad (2016)

No beneficiamento, a rocha encaixante e outras impurezas minerais são removidas do minério com auxílio das operações de fragmentação e classificação por

tamanhos. O concentrado final é um material inerte, leve, incombustível e insolúvel em água e todos solventes orgânicos. Quando aquecida se expande (esfolia) até 30 vezes o seu volume original. Esse processo de esfoliação transforma os flocos densos de minério em grânulos porosos e leves, contendo inúmeras camadas de ar diminutas (França et al., 2016).

A vermiculita expandida (esfoliada) é leve e fácil de manusear, tem um elevado grau de isolamento, propriedades de isolamento acústico e capacidade de absorver e reter uma vasta gama de líquidos (orgânicos e inorgânicos). Esse material esfoliado é usado na fabricação de freios automotivos, isolamento térmico de paredes e telhados, produtos da construção civil, rações para animais, horticultura e muitas outras aplicações industriais (DUPRÉ MINERALS, 2016).

2.5.1. Mineralogia e geologia

Segundo França et al. (2016), mineralogicamente, a vermiculita pertence ao grupo dos filossilicatos, podendo ser oriunda de processos metamórficos, magmáticos, hidrotermais, diagenéticos e intempéricos. Possui hábito achatado ou escamado e clivagem basal perfeita a proeminente; suas lamelas de clivagem (placas) são flexíveis elásticas ou plásticas, mais raramente quebradiças. De um modo geral, os filossilicatos argilosos, como a vermiculita, exibem baixa dureza (entre 1,5 a 2 na escala Mohs), e densidade relativamente baixa em relação a outros silicatos. Sua fórmula química geral está representada na Equação 1 (UNESP, 2016):



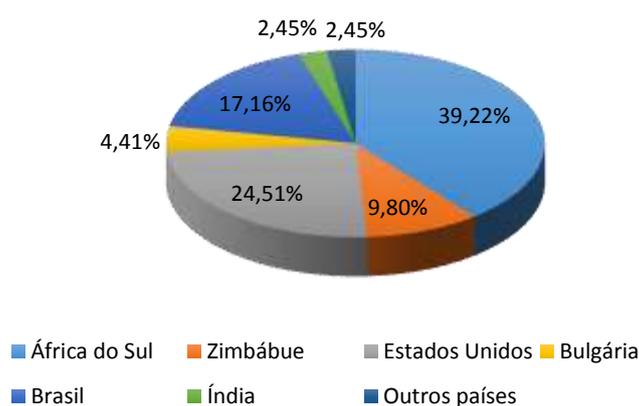
A composição química geral de uma vermiculita, em termos de óxidos, é 14,4% MgO, 43,5% Al₂O₃, 12,8% FeO, 11,9% SiO₂, 17,9% H₂O. Porém, é comum a substituição do cálcio por sódio ou potássio, como no caso da vermiculita de Santa Luzia, PB, que tem um teor de aproximadamente 5% de K₂O em sua composição (França et al., 2016).

2.5.2. Produção

Segundo Carvalhaes (2015) em seu relatório para o DNPM (Departamento Nacional de Produção Mineral), descreve que o Brasil representa 13,9% da produção mundial de vermiculita, apresentando em 2014 mais de 56 mil toneladas produzidas, o que representa uma queda de 6,5% quando comparado ao ano anterior, aonde sua produção mundial chegou a mais de 68 mil toneladas.

Tanner (2016) para MINERAL COMMODITY SUMMARIES descreve que os dados de reservas mundiais avaliados nos anos de 2015 que classificam o Brasil com mais de 10% do minério. Carvalhaes (2015), destaca que esses 10%, referentes as reservas mundiais de vermiculita brasileira, se concentram em cinco estados do país, sendo eles: Goiás (66,7%) ocupando a primeira posição, seguido dos Estados da Paraíba (19,1%), Bahia (13,3%), Piauí (0,9%) e Pernambuco (0,05%). O autor estima que 381 e 408 mil toneladas métricas de vermiculita foram produzidas em todo o mundo nos anos de 2014 e 2015, respectivamente. Os principais países que representaram aproximadamente 97,5% da produção mundial de vermiculita são a África do Sul, Estados Unidos, Brasil, Zimbábue, Bulgária e Índia, dados estes interpretados graficamente por Rashad (2016) através da Figura 2.

Figura 2 - Porcentagem de produção de vermiculita relacionada à produção mundial total em 2015



Fonte: Rashad (2016)

2.5.3. Aplicações

A vermiculita é um mineral micáceo, com vasta aplicação industrial devido às peculiaridades da sua estrutura química e mineralógica. Suas características físicas são as mesmas das micas, no que se refere à clivagem típica, separando-se em finas lamelas flexíveis, porém sem elasticidade. A perda do conteúdo de água da sua estrutura permite a sua modificação estrutural, quando submetida a temperaturas acima de 900°C, tornando-a um material esfoliado, com aspecto de partículas sanfonadas, e com volume de 10 a 30 vezes maior (Hashem et al., 2015).

Os espaços vazios criados entre as lamelas de vermiculita, durante a sua expansão térmica, são como pequenos "bolsões" de ar, os quais conferem ao material uma excepcional capacidade de isolamento. As maiores vantagens desse produto para construção civil são o peso reduzido, além das propriedades de isolamento térmico e acústico, proporcionando conforto térmico e diminuição de ruídos entre pavimentos (NTC BRASIL, 2016).

Ainda quando expandida (Figura 3-b) confere aos produtos resistência ao fogo, propriedades isolantes térmicas e acústicas, adesão, resistência à formação de rachaduras e enrugamentos, esterilidade e também elevada absorção de líquidos, devido à sua porosidade também elevada (França e Luz, 2002).

Figura 3 – Imagens de amostras de vermiculita (Santa Luzia, PB): (a) vermiculita natural; (b) vermiculita expandida.



Fonte: Ugarte et al. (2004)

A vermiculita não se decompõe ou deteriora, sendo inodoro, não prejudicial à saúde e, possuindo também propriedades lubrificantes, bem como pode absorver até cinco vezes seu peso em água, essas propriedades lhe dão uma extraordinária condição de uso nos campos de construção civil, agricultura, indústria química, equipamentos, materiais especiais e outros. A principal destinação dada pelo mercado interno foi a

agricultura, na qual é utilizada como condicionador de solos, com uma representatividade de 87%. As demais destinações variaram entre usos na construção civil, fabricação de isolantes térmicos e de isolantes acústicos. Destaca-se a destinação de 10% para fabricação de peças para freios destinados a veículos automotores, uso até então não explorado no mercado interno (Carvalhaes, 2015).

2.5.4. Jazidas

No Brasil a exploração de vermiculita começou timidamente na década de 50 em São Paulo. Posteriormente surgiram as instalações para exploração nas regiões de Brumado (BA), de Sanclerlândia (GO), de São Luiz de Montes Belos (GO), em Paulistana (PI), em Santa Luzia (PB) e Ouvidor (GO), considerada atualmente, como a maior reserva do país. Atualmente a produção das minas localizadas no centro oeste do país tem vocação ao mercado interno enquanto que a produção das minas localizadas do Nordeste, devido à proximidade de portos, tem vantagem natural competitiva para exportação (Sznelwar e Scalabrin, 2009).

A produção nacional é hoje restrita a corpos máficos e ultramáficos, que têm dimensões reduzidas e em geral são subverticais e são divididos em dois tipos: 1) os derivados de alteração da mica flogopita em carbonatitos e 2) derivados de alteração da biotita em complexos metamórficos máfico-ultramáficos serpentinizados (Ugarte et al., 2008). Reis (2002), classifica como derivados de alteração da mica em complexos carbonáticos apenas o depósito localizado em Ouvidor (GO) e os derivados de alterações de micas em complexos máficos e ultramáficos os depósitos de Queimada Nova (PI), Santa Luzia (PB), Sanclerlândia (GO), Montes Belos (GO) e Brumado (BA).

Em geral, o processamento do minério lavrado é feito na própria mina, todavia, há casos, característicos de pequenas jazidas, em que a usina de processamento situa-se a maiores distâncias da mina. Desse modo, o transporte é realizado por caminhões de pequeno porte, em auto-estrada. Nas duas situações há sempre a remoção de uma quantidade significativa de material estéril (Ugarte et al., 2008).

Ugarte et al. (2008), complementam que devido aos custos de mineração e beneficiamento, além daqueles relativos ao transporte do concentrado final, é desejável lavar a vermiculita com teor bastante elevado. Mesmo assim, os minérios de baixo teor (entre 20 e 30%) podem ser aproveitados economicamente. Os minérios ricos ou com teores elevados chegam até a 80% de vermiculita.

Em relação ao beneficiamento do minério de vermiculita, Carvalhaes (2015), destaca que no ano de 2014, os Estados de Goiás (92,1%), Pernambuco (5,7%), Paraíba (2%) e Bahia (0,2%) foram responsáveis pela produção de 56.444 toneladas de vermiculita beneficiada.

Os minérios e concentrados são normalmente analisados pelo teor de vermiculita e tamanho das partículas. A amostra seca é peneirada em várias frações segundo a classificação granulométrica, feita utilizando o padrão brasileiro ou o padrão americano, o qual, segundo Reis (2001), varia de grau 1 ou >3.327mm até 5 ou <0.3mm, denominado micron.

A Tabela 1 abaixo detalha a diferença entre o padrão brasileiro, o padrão americano e o internacional (Ugarte et al., 2008).

Tabela 1 - Classificação de vermiculita

Padrão Internacional	Dimensão de partícula em mm	Padrão Americano	Dimensão de partícula em mm	Padrão Brasileiro	Dimensão de partícula em mm
Large	8,0 a + 2,8	1	7,0 a + 3,327	-	-
Medium	4,0 a + 1,4	2	3,5 a + 1,75	Médio	55 – 95% > 2,4
Fine	2,0 a + 0,71	3	2,0 a + 0,6	Fino	65 – 95% > 2,4
Superfine	1,0 a + 0,355	4	0,85 a + 0,212	Superfino	70 – 95% > 2,4
Micron	0,71 a + 0,25	5	0,3	Micron	80 – 100% > 0,3

Fonte: Reis (2001)

Alencar et al. (2015), consideram que para a empresa não é de valor econômico extrair a vermiculita de forma micro fina, devido à falta de comércio, sendo então esse material descartado, contendo ainda bastante minério, e ainda podendo ser utilizado como material fertilizante por suas propriedades

2.5.5. Resíduos

Admite-se como rejeitos da vermiculita, os materiais que não contem viabilidade econômica, constituídos de solos com altos teores de matérias orgânicos, nutrientes e minerais. A acumulação do rejeito quando feita de forma desordenada, acarreta em significativas alterações topográficas e consequente poluição visual (Leite, 2013, apud Alencar et al., 2015).

No estudo referente ao Diagnóstico espaço-temporal das áreas impactadas pela MPL - Mineração Pedra Lavrada (Santa Luzia-PB), na extração de vermiculita, por Alencar et al. (2015), apresentam que o rejeito gerado pela mineradora é de grande quantidade, a empresa gera a partir da sua produção diária 3% de rejeito acumulado de forma incorreta.

Na Tabela 2, é possível observar esses valores mais claramente, onde foi calculado o volume do rejeito depositado.

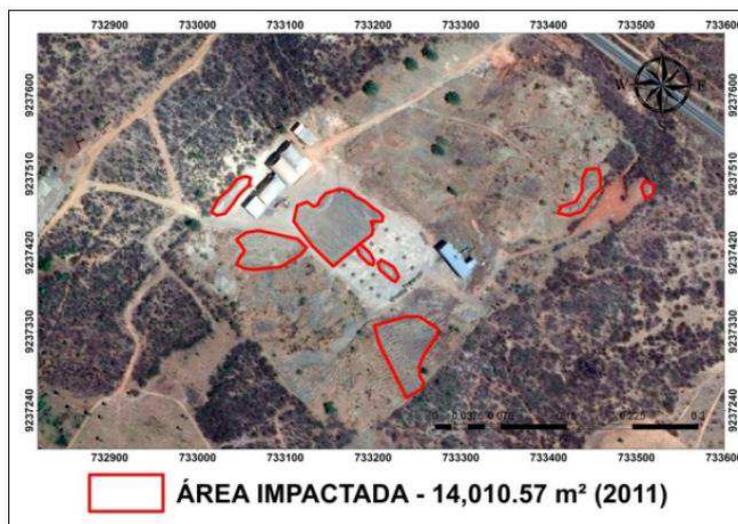
Tabela 2 - Área impactada no pátio operacional

Ano	Área (m²)	Volume (m³)	Porcentagem (%)
2011	14.010,57	56.042,28	8%
2013	68.978,43	215.913,72	35%

Fonte: (Alencar et at., 2015)

Alencar et al. (2015), apresentam através de imagens registradas por saltites, o aumento da área impactada pelo aumento do rejeito de vermiculita, durante os anos de 2011(Figura 4) e 2013 (Figura 5), como pode-se observar a seguir.

Figura 4 - Expansão das áreas impactadas no pátio operacional em 2011



Fonte: Alencar et al. (2015)

Figura 5 - Expansão das áreas impactadas no pátio operacional em 2013



Fonte: Alencar et al. (2015)

2.6. Argamassa

2.6.1. Definições e aplicações

A NBR 13281 (ABNT, 2005) estabelece como argamassa uma mistura homogênea de agregado miúdo, aglomerante inorgânico e água, contendo ou não

aditivos, com propriedades de aderência e endurecimento, podendo ser dosada em obra ou em instalação própria (argamassa industrializada).

A argamassa pode ser empregada no assentamento e/ou revestimento, nesta última opção, a NBR 13529 (ABNT, 2013) define sistema de revestimento como um conjunto formado por argamassa e acabamento, compatível com a natureza da base, condições de exposição, acabamento final e desempenho, previstos em projeto. A referida norma expõem que essa classificação de argamassa pode ser constituída por várias camadas e funções específicas, conforme descrito a seguir:

- Chapisco: Camada de preparo da base, aplicada de forma contínua ou descontínua, com a finalidade de uniformizar a superfície quanto à absorção e melhorar a aderência do revestimento.
- Emboço: Camada de revestimento executada para cobrir e regularizar a superfície da base ou chapisco, propiciando uma superfície que permita receber outra camada, de reboco ou de revestimento decorativo, ou que se constitua no acabamento final.
- Reboco: Camada de revestimento utilizada para cobrimento do emboço, propiciando uma superfície que permita receber o revestimento decorativo ou que se constitua no acabamento final.
- Acabamento decorativo: Revestimento decorativo aplicado sobre o revestimento de argamassa, como pintura, materiais cerâmicos, pedras naturais, placas laminadas, têxteis e papel.

2.6.2. Função das argamassas

Recena (2012), afirma que qualquer material empregado isoladamente ou compondo sistemas deve desempenhar funções definidas em uma edificação, inclusive garantindo o efeito estético esperado. No caso das argamassas, consideradas como um elemento de um sistema e não isoladamente como um material, levando em consideração sua interação com o substrato e com o ambiente, determina que é possível admitir como funções primordiais: impermeabilizar o substrato de aplicação; garantir um bom acabamento ao parâmetro revestido; absorver as deformações naturais a que a

estrutura está sujeita; regularizar e/ ou proteger mecanicamente substratos constituídos por sistemas de impermeabilização ou isolamento termo acústico.

Ainda segundo Recena (2012), para o cumprimento das funções relacionadas, as argamassas deverão necessariamente apresentar as propriedades discutidas a seguir, consideradas as mais importantes por serem fundamentais ao bom desempenho dos diversos tipos de argamassa.

2.6.3. Propriedades das argamassas no estado fresco

2.6.3.1. Consistência

Recena (2012) declara que a trabalhabilidade das argamassas estará diretamente ligada à quantidade de água empregada em sua preparação, desde que haja uma quantidade tal de material fino, preferencialmente aglomerante, suficiente para reter a água adicionada, garantindo a estabilidade de volume e a coesão necessária para promover a aderência instantânea sem ocorrência de segregação de seus constituintes.

Fontes et al. (2016), em seu estudo sobre argamassas produzidas com rejeitos de minério de ferro de represas de decantação, concluíram que quanto maior a proporção de rejeito na argamassa, maior a quantidade necessária de água para atingir o índice de consistência adequado.

Medeiros (2016), em seu estudo sobre argamassas de revestimento com resíduo de scheelita, apresenta dados em relação aos ensaios de consistência entres os índices água/materiais secos para cada formulação e para o espalhamento requerido, onde é perceptível que os índices para as argamassas com cimento e cal são maiores que os índices para as argamassas apenas com o cimento como aglomerante. O mesmo esclarece que tal fato ocorre pelo aumento da superfície específica da fração aglomerante da mistura, visto que a cal possui maior finura que o cimento e conseqüentemente maior consumo de água para uma mesma consistência.

2.6.3.2. Densidade de massa e Teor de ar incorporado

Fontes et al. (2016), estudaram argamassas produzidas com rejeitos de minério de ferro e também constataram um aumento da densidade de massa a partir do aumento do teor de substituição do agregado em relação a argamassa de referência. O que pode

ser justificado, pois o resíduo utilizado possui uma quantidade maior de finos do que o agregado natural promovendo assim uma melhor junção dos grãos.

Medeiros (2016) explica em seu experimento que as argamassas de traço 1:3 (cimento), apresentaram densidades maiores que as de traço 1:1:6 (cimento e cal), para todos os teores de substituição do agregado. Isto pode ser explicado devido o cimento ser um aglomerante de massa específica maior que a cal. Também é observado que o aumento do teor de substituição do agregado resulta num aumento da densidade de massa para todas as formulações (0%, 25%, 50%, 75% e 100%), isso se deve ao fato do agregado natural, a areia, possuir uma massa específica menor que o resíduo de scheelita natural.

Em relação ao teor de ar incorporado, Fontes et al. (2016) em seu estudo sobre argamassas produzidas com rejeitos de minério de ferro de represas de decantação expõem que a capacidade de incorporação de ar apresenta valores menores em relação a argamassa de referência. Sendo justificada pelos autores devido à finura do resíduo e consequentemente melhor união dos grãos, que o agregado natural.

2.6.3.3. Retenção de água

Recena (2012), explica que a retenção de água é a capacidade de uma argamassa de liberar demoradamente a água empregada na sua preparação para o meio ambiente ou para substratos porosos. Quanto maior a quantidade de água empregada na preparação de uma argamassa, maior igualmente o volume de água a ser evaporado, gerando sempre retração por maior que seja a capacidade de uma mistura em reter água.

Medeiros (2016) avaliou as argamassas em seu experimento quanto a retenção de água e os resultados demonstram uma pequena variação. Obteve a conclusão que as argamassas que utilizaram uma sua composição cal e cimento apresentam moires retenções de água do que as argamassas com cimento. Sendo explicado pela maior superfície específica (finura) da cal que aumenta a retenção de água na argamassa, adsorvendo a água e impedindo sua passagem através da massa sólida.

Fontes et al. (2013) e Santamaría-Vicario et al. (2015) realizaram pesquisas semelhantes e contataram que os traços compostos com agregado reciclado em substituição ao agregado natural nas argamassas, apresentaram valores de retenção de água superiores aos dos traços naturais.

2.6.4. Propriedades das argamassas no estado endurecido

2.6.4.1. Resistências à compressão

Higashiyama et al. (2012), estudaram argamassas contendo agregados de resíduos cerâmicos. Os resultados apresentaram resistência à compressão maior do que a argamassa confeccionada com agregado natural. Os autores concluíram que o resultado foi possível devido a quantidade de finos presente no resíduo ser maior que na areia, melhorando a coesão entre o agregado e a pasta de cimento e conseqüentemente sua estrutura de poros.

Medeiros (2016) também obteve resultados de resistência a compressão maiores em argamassas contendo resíduos minerais de scheelita do que a argamassa fabricada com agregado natural. Quando comparado as diferentes substituições do agregado pelo resíduo, as argamassas com 100% de substituição tiveram o maior valor para resistência a compressão. O autor associa esse aumento com a diminuição do teor de ar incorporado para todos os traços e ainda complementa que os valores de resistência à compressão das argamassas estão ligados à propriedade de durabilidade da mesma e servem como parâmetro de comparação entre os teores de substituição dos agregados pelo resíduo.

Outro fator que pode influenciar os resultados de resistência mecânica é a proporção de cimento na mistura. Fontes et al. (2016), analisaram em seu experimento o desempenho mecânico de argamassas com rejeito, no teste de compressão concluíram que a argamassa incorporada com o rejeito de minério de ferro apresentou um melhor desempenho. Justificam esse resultado pela maior proporção de cimento, pois quanto maior, melhor será o desempenho mecânico da argamassa, devido aos fenômenos de empacotamento de grãos do rejeito pelos produtos da hidratação do cimento.

2.6.4.2. Resistência à tração

A resistência à tração apresenta semelhança aos resultados obtidos para a resistência à compressão, onde o ganho de resistência é mais expressivo para os testes que contém o rejeito como substituição do agregado natural. O motivo desse desempenho melhorado é que, com o rejeito, a matriz se torna mais contínua e fornece

um meio melhor para a formação de produtos de hidratação. Além disso, a relação água/cimento em argamassas que contém o rejeito é maior, considerando também que um diâmetro médio menor para agregados reciclados cria uma estrutura com maior empacotamento (Fontes et al., 2016).

2.6.4.3. Absorção de água por imersão e índices de vazios

Silva et al. (2013), em sua pesquisa sobre argamassa de revestimento utilizando areia residual proveniente da produção de minérios, encontraram maior absorção de água nas argamassas produzidas com resíduo que a de referência, pois apresentou maiores índices de vazios.

Medeiros (2016) chegou à conclusão semelhante à de Silva et al. (2013) onde os índices de vazios aumentam à medida que a porcentagem de agregado natural é substituído por resíduo e o mesmo aconteceu quando comparou a taxa de absorção de água por imersão, apresentando assim, uma relação entre absorção por imersão e índices de vazios. Justifica que as amostras com maior quantidade de resíduo possuem mais poros permeáveis que as amostras fabricadas com areia natural e ainda complementa que as argamassas compostas de cal e cimento como aglomerante absorveram mais água que as argamassas compostas de apenas cimento como aglomerante.

2.6.4.4. Absorção de água por capilaridade

Silva et al. (2013), estudaram as propriedades das argamassas de revestimento fabricadas com areia residual proveniente da produção de minérios. As argamassas com areia de resíduo apresentaram coeficientes de capilaridade maiores em comparação a argamassa de referência. Segundo os autores, as argamassas produzidas com resíduo, além de apresentar maior absorção de água são, também, mais susceptíveis a penetração da água que a argamassa de referência. Ainda segundo os autores, este comportamento pode ser explicado pela relação entre a ascensão capilar da água nos corpos de provas ao inverso dos raios capilares que, provavelmente, são menores devido ao menor diâmetro dos grãos da areia de resíduo em relação à areia da argamassa de referência. Ou seja, maior número de grãos (devido ao maior teor de finos do resíduo) com menor raio capilar que a areia natural, favorecendo a ascensão capilar.

Pivotto e Abreu (2015), em sua pesquisa sobre areia de rejeito basáltico para produção de argamassas, constataram que as argamassas com areia de rejeito possuíam um aumento do coeficiente de capilaridade. Os autores explicam que este comportamento ocorre devido à maior rugosidade dos grãos do resíduo. Assim, a água introduzida na mistura para a manutenção da trabalhabilidade tende se concentrar em maior quantidade no entorno dos grãos e o aumento da relação água/cimento na zona de transição entre a pasta e agregado, compromete a porosidade, aumentando-a.

2.6.5. Argamassa com resíduos minerais

Fontes et al. (2013) buscaram por soluções sustentáveis, estudando o uso do resíduo das barragens de rejeito de minério de ferro como agregados reciclados para produção de argamassa. Os resultados encontrados pelos autores apresentam comportamento mecânico das argamassas compostas com rejeito superior, principalmente a idade de 28 dias, às argamassas produzidas com agregados naturais, tanto para compressão, quanto para tração na flexão. As argamassas produzidas com o agregado reciclado e com o agregado natural apresentaram a mesma trabalhabilidade, ainda que as argamassas com agregado reciclado contivessem quantidades maiores de água, menores teores de ar incorporado e maiores densidades de massa no estado fresco e endurecido, em função da elevada massa específica do rejeito.

Xu et al. (2016), estudaram argamassas à base de cal hidráulica preparadas com resíduo pó de mármore como agregado e diatomita/cinzas volantes como adição mineral. O estudo sugere a viabilidade da utilização destes resíduos, porém se detém em avaliar a influência das adições minerais na melhoria das propriedades destas argamassas. Os resultados indicaram que a resistência mecânica das argamassas preparadas com diatomita foi reforçada e as cinzas volantes adicionaram uma melhoria notável na resistência à flexão das argamassas. Sendo que a diatomita foi considerada mais eficaz do que as cinzas volantes para a melhoria das propriedades gerais das argamassas. Isso pode ser explicado devido a reação pozolânica entre os aditivos minerais e a cal, que ocorreram principalmente durante o período de cura de 14 e 28 dias.

Fontes et al. (2016), investigaram a fabricação de argamassas para assentamento e revestimento produzidas com rejeitos de minério de ferro a partir de represas de decantação. Com o objetivo de mitigar o impacto ambiental da indústria de mineração

de ferro, a pesquisa avaliou a viabilidade técnica destes rejeitos como material de construção, em argamassas para assentamento e revestimento. Três tipos de misturas foram produzidas: argamassas convencionais, argamassas com substituição completa do agregado natural pelo rejeito e argamassas onde houve substituição da cal por rejeito na proporção de 10%, 20%, 50% e 100%. Os resultados da pesquisa apresentaram um aumento da densidade aparente, redução dos níveis de ar incorporado e propriedades mecânicas foram melhoradas quando comparadas com as argamassas convencionais.

Silva et al. (2013), estudaram argamassas de revestimento fabricadas com areia residual proveniente da produção de minérios e observaram que apesar de menor resistência mecânica e maior permeabilidade à água que a argamassa de referência, foi possível a obtenção de uma argamassa com boa trabalhabilidade e melhor adesão ao substrato, através da sua granulometria contínua e a utilização de aditivos incorporadores de ar, resultando em um revestimento com boa adesão e sem apresentar fissuras.

Ainda sob a problemática ambiental na indústria da mineração, Pivotto e Abreu (2015) elaboraram uma pesquisa para analisar a produção de argamassas com areia de rejeito basáltico. As argamassas estudadas foram produzidas com substituição parcial da areia natural de rio por areia de rejeito basáltico, resultante de processo de extração de ametista. Foram confeccionadas argamassas com traços de cimento, cal e agregado miúdo, em volume, nas proporções 1:1:6; 1:2:8 e 1:2,3:10, produzidas com 0%, 25% e 50% areia de rejeito em substituição à areia natural de rio. Os resultados obtidos destacaram um favorecimento da resistência mecânica nas argamassas produzidas com rejeito, principalmente para os traços médio e pobre; os coeficientes de capilaridade foram maiores para as argamassas produzidas com rejeito, que evidenciaram uma maior demanda de água em relação a argamassa convencional produzida com areia de rio. Sendo que os autores concluíram serem necessárias maiores investigações para que seja comprovada a viabilidade de uso deste rejeito com material para produção de argamassas.

Guacelli et al. (2015) também pesquisaram sobre material basáltico. O experimento analisou a substituição de areia de extração pela areia de britagem de rochas basálticas em argamassa de revestimento. Foi adotado um traço de 1:1:6 (cimento, cal, areia) em volume e adicionou-se as proporções 50%, 70% e 100% de areia de britagem. Como resultado da pesquisa, os autores puderam observar que o aumento da proporção da areia de britagem na argamassa, acarretou uma redução da

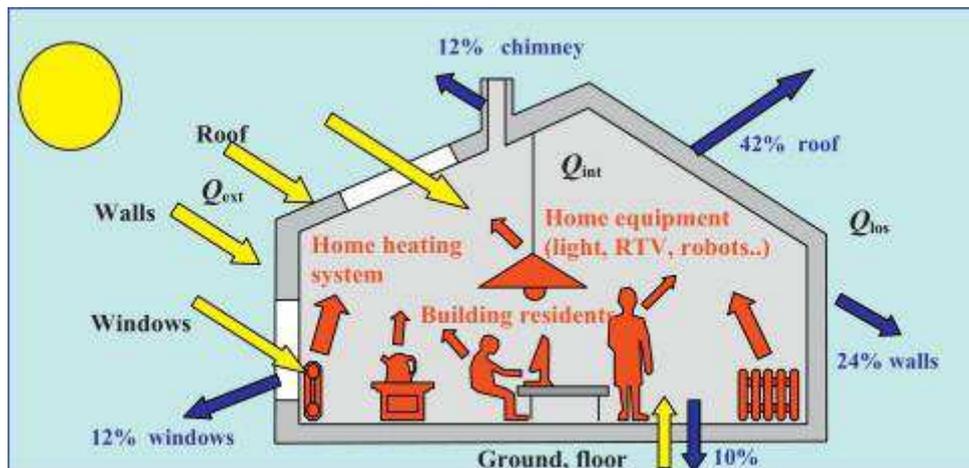
relação água/cimento para uma determinada consistência, redução de água exsudada e aumento da densidade. No estado endurecido, foi observado um aumento na resistência à compressão, aumento da densidade, aumento no módulo de elasticidade e aumento na intensidade de fissuração. Após análise de todos os resultados, os autores concluíram que é viável a utilização de areia de britagem para a produção de argamassas na proporção de 50% em substituição à areia de extração convencional.

2.7. Comportamento térmico

Em uma abordagem sustentável, os edifícios devem ser projetados para garantir o conforto térmico dos ocupantes durante todo o ano, com energia auxiliar mínima para aquecimento e resfriamento. Em abordagens não sustentáveis, os edifícios dependem cada vez mais de sistemas de aquecimento e resfriamento para garantir o conforto térmico interno, resultando no aumento do consumo de energia e das emissões de gases do efeito estufa. Conseqüentemente, há também um aumento nos custos de utilização dos edifícios, causado pelo impacto da operação dos sistemas (Cunha et al., 2016).

Para as condições de vida serem confortáveis, independentemente da estação, a temperatura interior de uma edificação precisa ser mantida em um determinado nível, ajustada individualmente de acordo com os gostos dos habitantes, em média de 15 a 25 °C. No inverno, no entanto, na ausência de seus habitantes, é suficiente que essa temperatura seja mantida em um mínimo de 5 °C, a Figura 6 mostra o equilíbrio de fontes e tipos de energia em um determinado ambiente. Os fluxos de energia que atingem a edificação de fora (energia solar e terrestre) são marcados em amarelo. As fontes e fluxos de energia térmica produzida dentro do edifício são mostrados em vermelho, estes são principalmente fluxos do sistema de aquecimento, mas também são geradas por eletrodomésticos, como ferros, aspiradores, máquinas de lavar roupa, secadores, aparelhos de TV e fogões e seus habitantes. A corrente de energia perdida do edifício está marcada em azul. As porcentagens apresentadas são os valores médios de um agregado familiar típico. Dependendo dos tipos de materiais de construção e técnicas de construção (típicas, economizadoras de energia, passivas, energeticamente autossuficientes), essas perdas percentuais de energia podem ser diferentes das que são mostradas na ilustração (Lewandowski e Lewandowska-Iwaniak, 2014).

Figura 6 - A energia que flui em um edifício típico: produzido no interior (vermelho), perdas de calor (azul) e fluxos de energia que entram do exterior (amarelo)



Fonte: Lewandowski e Lewandowska-Iwaniak (2014)

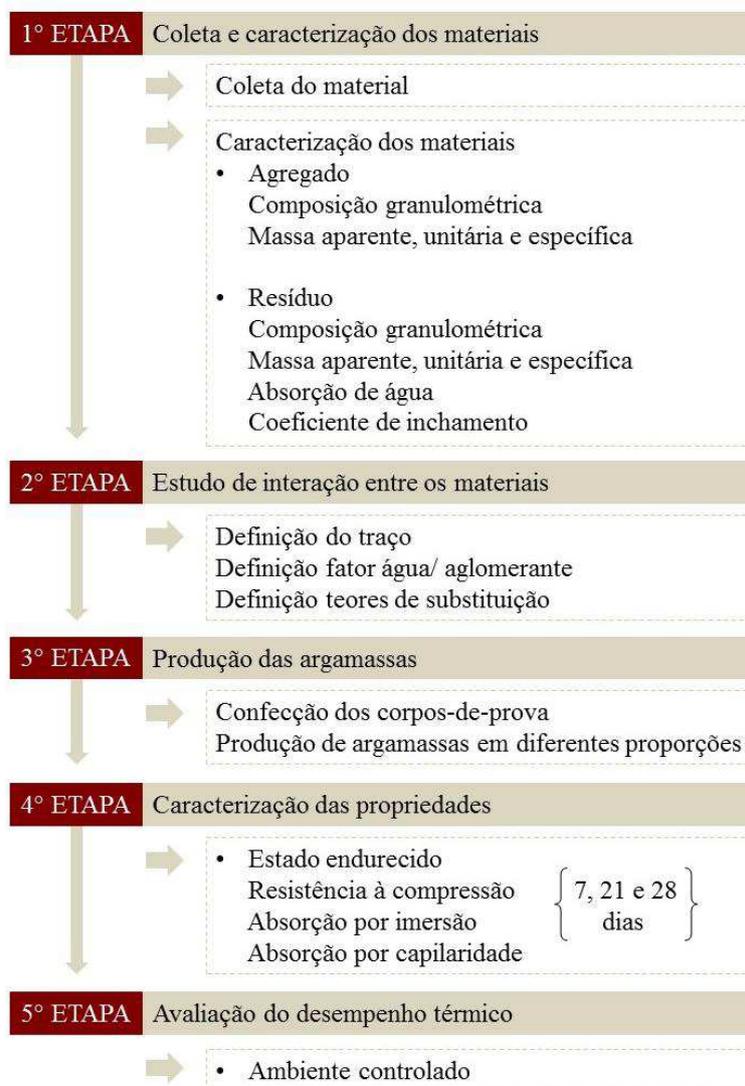
Cunha et al. (2016), explica que as argamassas com incorporação de materiais, que têm a capacidade de reduzir as variações de temperatura, para revestimento interno podem ser vistas como uma chave para resolver ou minimizar o consumo energético massivo relacionado aos edifícios. Podendo assim, trazer benefícios sociais que estão diretamente ligados ao aumento do conforto térmico. O aspecto ambiental diz respeito à redução do esgotamento de combustíveis fósseis relacionados com a diminuição do uso de equipamentos de ar condicionado. Os benefícios econômicos estão relacionados com a redução do consumo de energia e o tempo de espera para as horas de menor demanda.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Em conformidade com os objetivos desta pesquisa, este tópico apresenta a descrição do programa experimental empregado para a avaliação do desempenho termomecânico de argamassas com resíduos de vermiculita.

O experimento foi desenvolvido no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (LaCRA) localizado na Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) – PB, durante de 9 meses, a partir do mês de outubro do ano de 2017, conforme etapas no fluxograma seguinte (Figura 7).

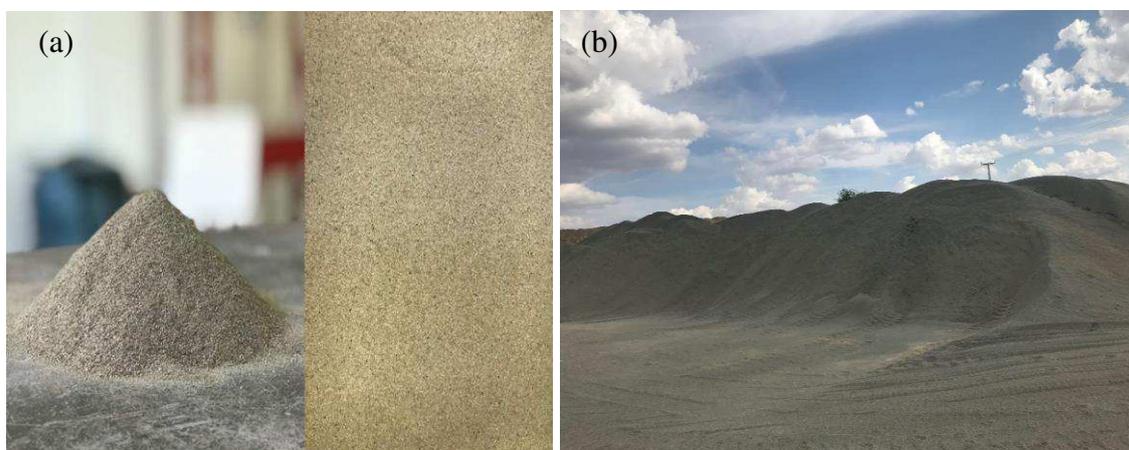
Figura 7 - Fluxograma com etapas do experimento



3.1. Coleta do resíduo

A coleta do resíduo de vermiculita, foi realizada na empresa Mineração Pedra Lavrada Ltda (MPL), localizada em Santa Luzia – PB as margens da BR 230, KM 277. Foram coletados cerca de 100 Kg do material proveniente do processo de beneficiamento, que se encontrava em grandes pilhas na propriedade da mineradora (Figuras 8 A e B).

Figura 8 - (a) Aspecto resíduo de vermiculita; (b) Material descartado dentro da Mineradora Pedra Lavrada Ltda (MPL).



A caracterização dos materiais utilizados na produção da argamassa, seguiram as especificações da ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas.

3.2. Caracterização dos materiais para produção das argamassas

3.2.1. Distribuição granulométrica do resíduo de vermiculita e da areia natural

Empregou-se como agregado miúdo a areia natural, obtida do leito do Rio Paraíba, entre Barra de Santana e Cabaceiras - PB. Utilizou-se também como agregado miúdo o resíduo de vermiculita em substituição à areia natural em sua porção fina, similar às características físicas de granulometria da areia.

Diante disso, foi necessário realizar o ensaio de composição granulométrica dos agregados conforme NBR NM 248 (ABNT, 2003), sendo utilizado o conjunto de peneiras e mesa vibratória apresentados na Figura 9.

Figura 9 - (a) Série de peneiras; (b) Mesa vibratória.



O conjunto de peneiras utilizadas corresponde às malhas 4,8mm, 2,4mm, 1,2mm, 0,6mm, 0,3mm e 0,15mm, com fundo coletor e tampa, de acordo com NBR citada anteriormente. Após o ensaio foram calculadas as porcentagens dos materiais retidos e acumulados em cada peneira.

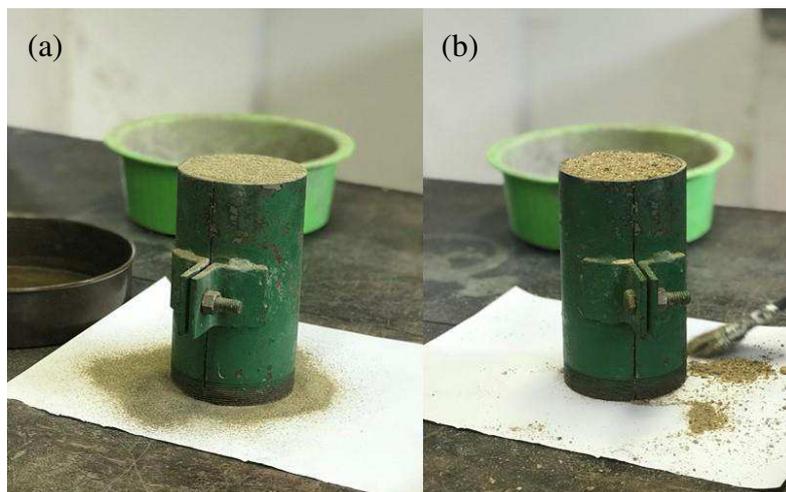
O módulo de finura foi calculado pela soma das porcentagens retidas acumuladas em massa da areia e do resíduo, nas peneiras da série normal, dividida por 100, com aproximação de 0,01.

As dimensões máximas características da areia e do resíduo correspondem à abertura nominal, em mm, da malha da peneira da série normal ou intermediária na qual cada material apresentou uma porcentagem retida acumulada igual ou imediatamente inferior a 5% em massa.

3.2.2. Ensaio de massa unitária do resíduo de vermiculita e da areia natural

A massa unitária do resíduo de vermiculita e da areia foi obtida através de métodos descritos NBR NM 45 (ABNT, 2006) (Figura 10).

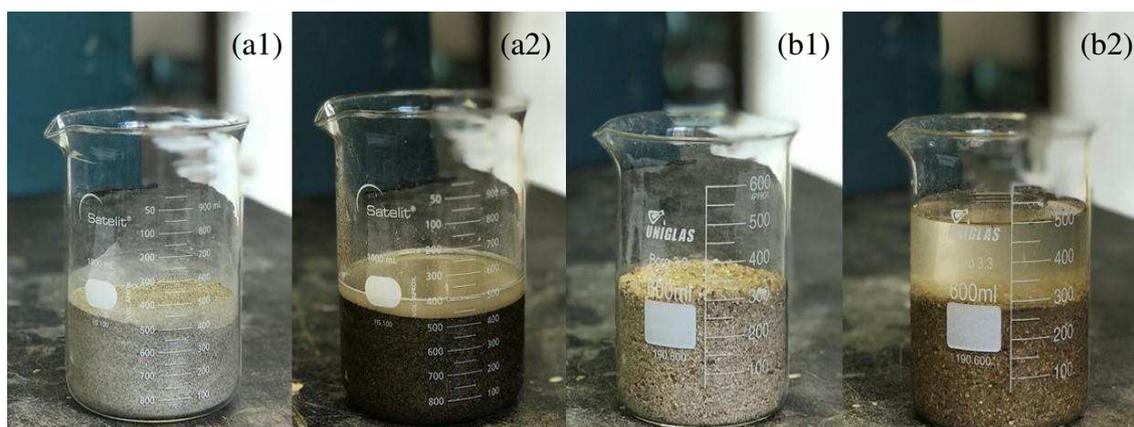
Figura 10 - Ensaio de determinação da massa unitária, (a) resíduo de vermiculita e (b) areia natural.



3.2.3. Ensaio de massa específica do resíduo de vermiculita e da areia natural

A massa específica e massa específica aparente do resíduo de vermiculita e da areia natural foram obtidas pelo método descrito na NBR NM 52 (ABNT, 2003) (Figura 11).

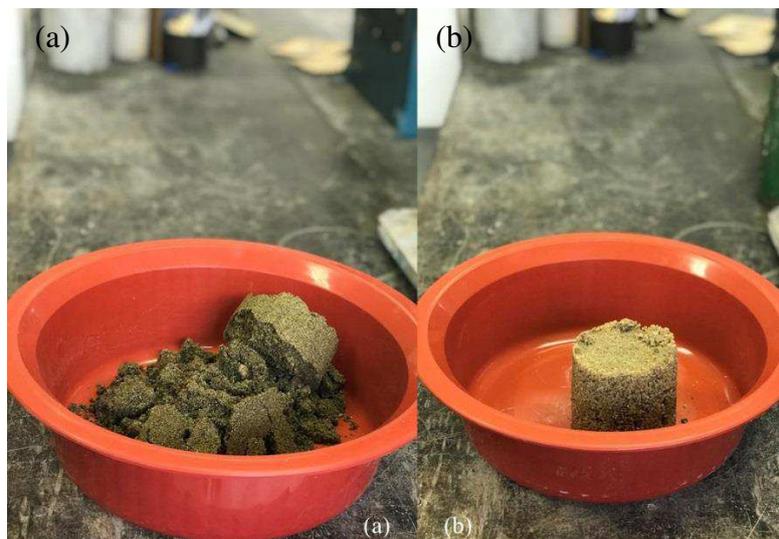
Figura 11 - Ensaio de determinação da massa específica e massa específica aparente, (a1 e a2) resíduo de vermiculita e (b1 e b2) areia natural.



3.2.4. Ensaio de absorção de água do resíduo de vermiculita e da areia natural

A absorção de água do resíduo de vermiculita e da areia natural foi determinada através do método descrito na NBR NM 30 (ABNT, 2001), conforme Figura 12.

Figura 12 - Ensaio de determinação da absorção de água do resíduo de vermiculita (a) e areia natural (b)



3.2.5. Ensaio do coeficiente de inchamento do resíduo de vermiculita

O coeficiente de inchamento do resíduo foi realizado por meio da NBR 6467 (ABNT, 2006).

3.2.6. Aglomerante

Na produção das argamassas, empregou-se o cimento Portland CP II Z – 32, fabricado pela empresa Montes Claros. A escolha deste tipo específico de cimento Portland se deve a adição do material pozolânico, facilidade de acesso no mercado e por apresentar indicação para fabricação de argamassas de revestimento, se enquadrando na proposta deste estudo.

3.2.7. Água

A água utilizada foi proveniente da rede pública de abastecimento do município de Campina Grande, fornecida pela CAGEPA (Companhia de Água e Esgotos da Paraíba).

3.3. Procedimento experimental

Inicialmente foi definido o traço da argamassa, sendo 1:4 (cimento: areia), apresentando-se como usual para argamassas que contém apenas cimento e areia em sua composição, conforme estabelecido por Araujo et al. (2000).

O traço foi calculado em massa e os teores de substituição do agregado por resíduo foram de 0%, 30%, 60% e 100%. A substituição só foi possível após a obtenção dos resultados dos testes de granulometria, que apresentaram as frações onde se concentravam as maiores quantidades de material (tanto da areia como do resíduo), sendo assim possível realizar o peneiramento (da malha 0,60mm para 0,30mm) da areia natural, onde a porção fina obtida (semelhante à granulometria do resíduo) era descartada e substituída pela devida proporção (30, 60 ou 100%) de resíduo de vermiculita.

Em seguida foi estabelecido o fator água/ aglomerante de 0,65 para a argamassa de referência, que teve como parâmetro valores utilizados em argamassas convencionais com a mesma aplicação. Para atingir a mesma consistência da argamassa de referência foi necessário aumentar o fator água/ cimento gradativamente à medida que se aumentava a proporção de substituição de areia natural por resíduo como mostra a Tabela 3.

Tabela 3 - Traço, composição e proporções do resíduo utilizado no experimento.

Traço	Composição do traço	Teor de substituição	Nomenclatura	Fator água/ aglomerante
1:4	cimento: areia (grossa + fina)	0%	AC0	0,65
1:4	cimento: areia (grossa + fina) + resíduo	30%	AC30	0,70
1:4	cimento: areia (grossa + fina) + resíduo	60%	AC60	0,75
1:4	cimento: areia (grossa) + resíduo	100%	AC100	0,85

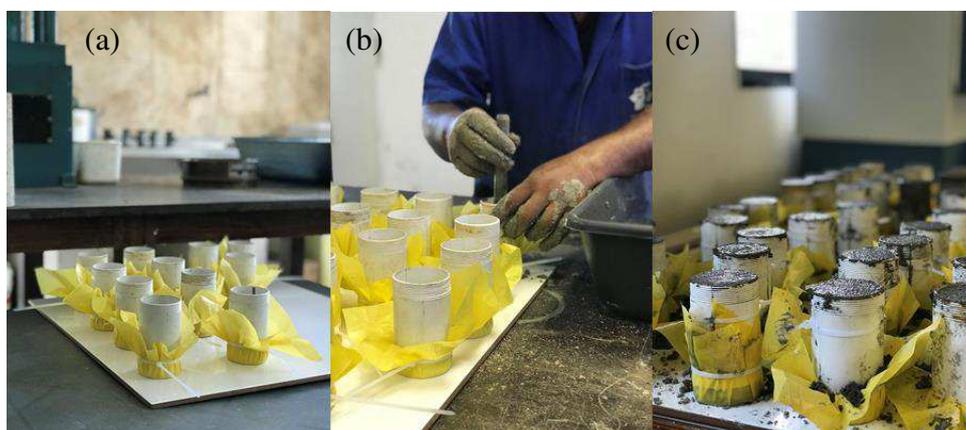
A nomenclatura adotada para as argamassas foi de “AC” (argamassas que contém apenas cimento como aglomerante em seu traço). Após a sigla AC, foi colocado o número que representa o teor de substituição da porção fina do agregado pelo resíduo

em porcentagem, por exemplo: AC0 representa 0% de substituição considerada argamassa de referência, a AC30 significa 30% de substituição da areia pelo resíduo e assim sucessivamente.

3.4. Produção das argamassas

Após a elaboração dos testes com diferentes proporções dos agregados, foram confeccionados corpos-de-prova cilíndricos de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura (Figura 13), conforme NBR 7215 (ABNT, 1996).

Figura 13 – (a) Montagem dos corpos-de-prova; (b) Moldagem das argamassas nos corpos-de-prova; (c) Moldagem das argamassas finalizadas



Para cada proporção de resíduo (0%, 30%, 60% e 100%) foram utilizados quatro (4) corpos de prova para testes de resistência mecânica, 4 para testes de absorção por capilaridade e 4 para testes de absorção por imersão, com tempos de cura de 7, 21 e 28 dias respectivamente, totalizando 144 corpos de prova.

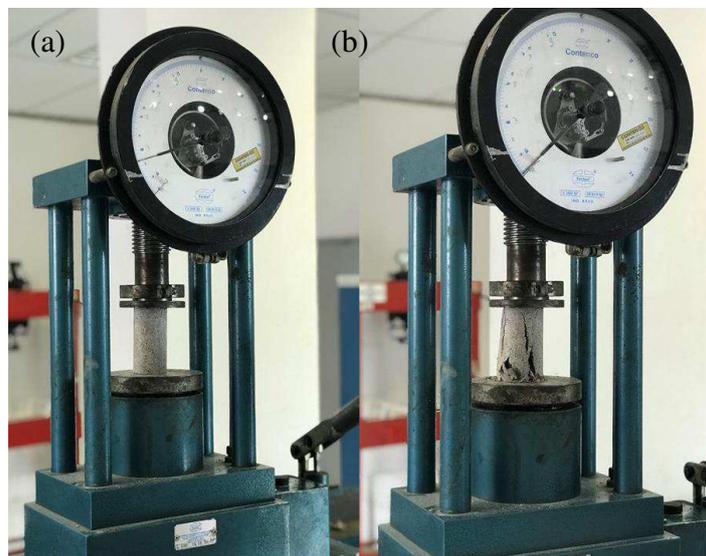
3.5. Caracterização das argamassas

3.5.1. Resistência à compressão

As avaliações de resistências à compressão (Figura 14) foram realizadas segundo as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 1996), sendo utilizados 4 corpos-de-prova para cada idade (7, 21 e 28 dias) em cada teor de substituição da porção fina da areia natural por resíduo de vermiculita, totalizando 36 corpos-de-prova. Os ensaios

foram realizados em máquina do tipo prensa para ensaios de compressão semiautomática com capacidade máxima de 24000 Kgf da marca *Pavitest*.

Figura 14 – (a) Equipamento com corpo-de-prova; (b) corpo-de-prova rompido em equipamento



3.5.1.2 Avaliação da eficiência do ensaio

Após o ensaio de resistência à compressão, foi necessário avaliar as operações realizadas nesta fase do experimento quanto a sua eficiência a partir do coeficiente de variação dos resultados (cve), inicialmente através da obtenção do desvio-padrão do ensaio pela média das amplitudes dos resultados dos exemplares, através da fórmula:

$$S_e = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{d_2 \times n} \quad (2)$$

Onde:

A_i = amplitude dos resultados, diferença entre o maior e menor resultado do exemplar em megapascals (MPa);

n = número de exemplares da amostra;

d_2 = coeficiente da tabela abaixo.

Tabela 4 - Coeficiente d2

Nº corpos-de-prova de exemplar	2	3	4	5	6
Coeficiente d₂	1,128	1,693	2,059	2,326	2,534

Fonte: NBR 5739 (ABNT, 2007).

Em seguida, foi calculado o coeficiente de variação do ensaio (cve) pela equação:

$$CV_e = \frac{S_e}{f_{cm}} \quad (3)$$

Onde:

CV_e = coeficiente de variação do ensaio;

S_e = desvio padrão calculado;

f_{cm} = resistência média dos exemplares, em Mpa.

Então, avaliada a eficiência do ensaio, de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 - Avaliação da eficiência do ensaio

Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4	Nível 5
Excelência	Muito bom	Bom	Razoável	Deficiente
$CV_e \leq 3,0$	$3,0 < CV_e \leq 4,0$	$4,0 < CV_e \leq 5,0$	$5,0 < CV_e \leq 6,0$	$CV_e \geq 6,0$

Fonte: NBR 5739 (ABNT, 2007).

3.5.2 Absorção de água por imersão

Este ensaio (Figura 15) realizado através de 4 corpos-de-prova para cada tempo de cura e em cada teor de substituição da porção fina da areia natural por resíduo de vermiculita, totalizou 36 unidades de corpos-de-prova. O ensaio seguiu todos os procedimentos descritos na NBR 9778 (ABNT, 2009).

Figura 15 - Ensaio de absorção de água por imersão



3.5.3 Absorção de água por capilaridade

A análise (Figura 16) seguiu os procedimentos adotados pela NBR 9779 (ABNT, 1995), utilizando, assim como nos ensaios supracitados, 4 corpos-de-prova para cada idade e em cada teor de substituição da porção fina da areia natural por resíduo de vermiculita, finalizando o ensaio com um total de 36 corpos-de-prova.

Figura 16 - Ensaio de absorção de água por capilaridade



3.6. Análise estatística das propriedades das argamassas

Após determinar as propriedades (resistência à compressão, absorção por imersão e absorção por capilaridade) das argamassas foi necessário realizar um estudo estatístico através de esquema fatorial 4 x 3, sendo 4 tratamentos (0%, 30%, 60% e

100%) em 3 níveis (7, 21 e 28 dias de cura), com 4 repetições em cada tratamento. Realizando um comparativo entre as diferentes proporções para cada período de cura e entre os períodos de cura na mesma proporção, através do teste de médias do programa R Development Core Team (2011).

3.7. Avaliação do comportamento térmico das argamassas

Os ensaios realizados durante todo o experimento, juntamente com a análise estatística dos resultados possibilitaram concluir qual a melhor e mais adequada proporção de substituição e tempo de cura dentre os que foram testados, para a devida aplicação como argamassa de revestimento. A partir desta conclusão se iniciou uma nova etapa no experimento, que se caracterizou como análise do desempenho térmico do novo material. Tal análise foi realizada com auxílio de curvas de temperatura traçadas a partir dos dados coletados no experimento.

O aparato montado para o experimento construiu-se de três partes fundamentais: sistema de instrumentação, placas de argamassa e protótipo.

O sistema de instrumentação foi composto por um arduino do tipo UNO (Figura 17) onde foi inserido um cartão de memória para armazenamento dos dados coletados, que posteriormente foram descarregados no computador utilizado para acompanhar e arquivar resultados. Também conectado ao arduino, foram colocados seis sensores (Figura 18) do tipo 18B20, apropriados a faixa de trabalho entre -55 °C a 125 °C, instalados nas placas de argamassa. Um dispositivo Termostato digital, modelo W1290 (Figura 19) de 220V com faixa de -50 °C a 110 °C, foi instalado para manter a temperatura do sistema o mais constante possível por meio de uma resistência que gerava energia colorífica.

Figura 17 - Arduino utilizado no programa experimental de instrumentação

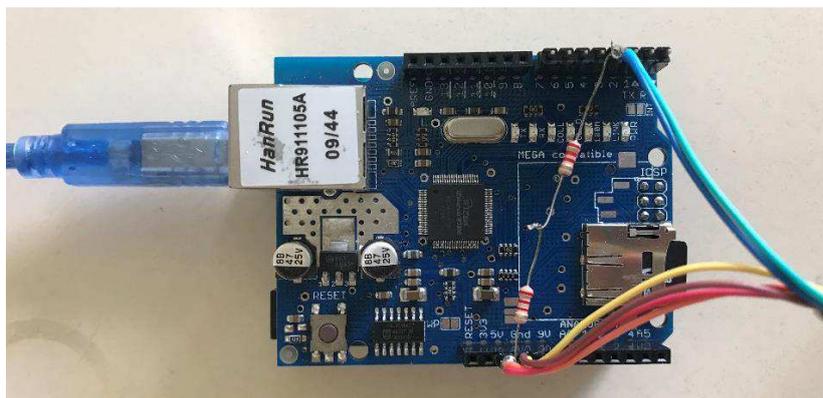


Figura 18 - Sensor utilizado no programa experimental de instrumentação

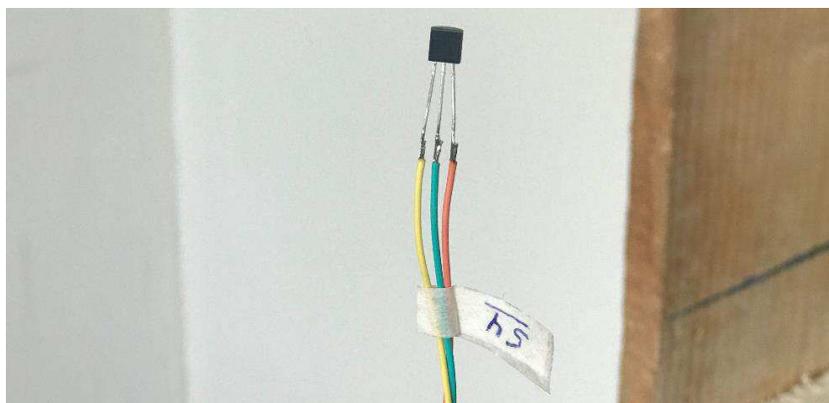
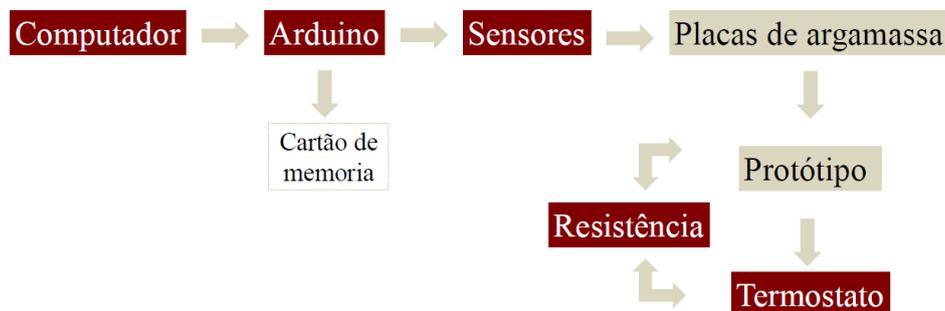


Figura 19 - Termostato utilizado no programa experimental de instrumentação



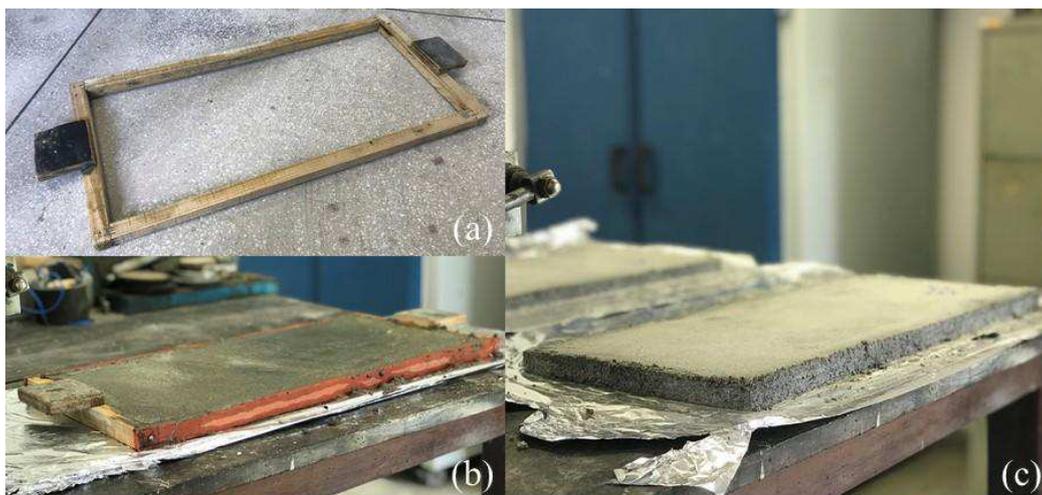
A Figura 20 apresenta um fluxograma do sistema de instrumentação conectado as demais partes constituintes.

Figura 20 - Fluxograma do sistema de instrumentação acoplado as demais partes constituintes



A segunda parte do aparato experimental foi formado pelas placas de argamassa (Figura 21) de referência e placas de argamassa do melhor teor de substituição obtido através dos ensaios no estado endurecido dos corpos-de-prova. Ao total foram produzidas 6 placas (3 para proporção de 0% e 3 para proporção com melhor resultado nos ensaios anteriores) de formato retangular com comprimento de 530 mm, largura 240 mm e 20mm cm de espessura, através de forma confeccionada no próprio laboratório (Figura 21-a) e seguindo procedimentos similares aos utilizados para confecção dos corpos-de-prova.

Figura 21 - Placa de argamassa, (a) Molde; (b) Moldagem; (c) Placa



Após o tempo de cura as placas foram marcadas com três pontos centralizados (Figura 22) em cada de suas faces (superior e inferior), identificando a localização para instalação dos sensores.

Figura 22 - Identificação da localização para instalar sensores na placa de argamassa



Os sensores foram instalados nas placas, primeiramente com fita isolante para proteção e em seguida cola quente para fixação dos mesmos na placa (Figura 23).

Figura 23 - Fixação dos sensores na placa de argamassa



A terceira e última parte do aparato experimental foi composta pelo protótipo (Figura 24), que uniu todas as partes citadas anteriormente. Denominada neste experimento como “caixa protegida” devido a sua estrutura que permitiu o isolamento das placas de argamassa de todas as outras variáveis (meteorológicas e ambientais) e foi desenvolvida por pesquisadores do Laboratório de Construções Rurais e Ambiência (Lacra).

A caixa possuindo dimensões externas de 560 mm de comprimento, largura 265 mm e 71 mm de altura, confeccionada com madeira tipo MDF e isopor. A caixa se divide em duas partes, a primeira em uma parte fechada caracterizada por gerar calor e atingir uma das faces da placa, onde seu fechamento superior ocorre com a própria placa (Figura 25) e uma tampa de isopor que fecha a caixa na parte frontal (Figura 26),

já a segunda parte não possui fechamento e foi definida como a face que não receberia calor, apenas se mantendo constante na temperatura ambiente.

Figura 24 - Vista frontal e perspectiva do protótipo



Figura 25 - Vista frontal e perspectiva do protótipo com placa de argamassa



Figura 26 - Vista frontal e perspectiva do protótipo com placa de argamassa e fechamento isopor



O ambiente em que a caixa protegida foi inserida apresentou temperatura constante próxima de 20°C por meio de um aparelho de ar condicionado existente no local, durante todo o ensaio.

Ao ligar o sistema elétrico, o termostato acoplado ao sensor (localizado dentro da parte fechada da caixa) controlava a temperatura do ar próximo à face da placa, quando o sensor detectasse temperatura de 40°C o termostato desligava a resistência até que a temperatura no sensor ficasse abaixo dos 40°C. Este processo foi repetido duas vezes em cada placa, estabilizando a temperatura em 40°C, sendo esta a temperatura programada no termostato.

Os dados de temperatura foram obtidos através do sistema de aquisição de dados, em que armazenava o valor médio das temperaturas coletadas em intervalos de 30 segundos, durante uma média de 1 hora para cada placa (3 unidades para 0% e 3 unidades para 60%), o que possibilitou avaliar o gradiente térmico entre as duas superfícies da placa, através da média de temperatura máxima (equação 4) e mínima (equação 5) para o mesmo momento em ambas as faces.

$$X_{máxP} = \frac{\Delta_{máx1} + \Delta_{máx2}}{2} \quad (4)$$

Onde:

$X_{máxP}$ = média de temperaturas máximas em cada placa, em °C;

$\Delta_{máx1}$ = média de temperaturas máximas entre as duas superfícies no primeiro pico de temperatura, em °C;

$\Delta_{máx2}$ = média de temperaturas máximas entre as duas superfícies no segundo pico de temperatura, em °C.

$$X_{mínP} = \frac{\Delta_{mín1} + \Delta_{mín2}}{2} \quad (5)$$

Onde:

$X_{mínP}$ = média de temperaturas mínimas em cada placa, em °C;

$\Delta_{mín1}$ = média de temperaturas mínimas entre as duas superfícies no primeiro declínio de temperatura, em °C;

$\Delta_{mín2}$ = média de temperaturas mínimas entre as duas superfícies no segundo declínio de temperatura, em °C.

Em seguida foi realizado o cálculo para a média final de temperaturas máximas e mínimas, em cada proporção (0% e 60%), através das equações 6 e 7, respectivamente.

$$\Delta_{máxY\%} = \frac{X_{máxP1} + X_{máxP2} + X_{máxP3}}{3} \quad (6)$$

$\Delta_{máxY\%}$ = média de temperaturas máximas para determinada proporção, em °C;

$X_{máxP1, P2 e P3}$ = média de temperaturas máximas em cada placa, em °C;

$$\Delta_{mínY\%} = \frac{X_{mínP1} + X_{mínP2} + X_{mínP3}}{3} \quad (7)$$

$\Delta_{mínY\%}$ = média de temperaturas mínimas para determinada proporção, em °C;

$X_{mínP1, P2 e P3}$ = média de temperaturas mínimas em cada placa, em °C;

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Ensaios preliminares de caracterização dos materiais

4.1.1. Distribuição granulométrica do resíduo de vermiculita e da areia natural

O resíduo de vermiculita possui uma predominância de grãos com diâmetros de 0,15mm (51,61%), diâmetro máximo de partículas 0,6mm e modulo de finura 1,11. Já a areia natural apresenta maior concentração de grãos na peneira 0,3mm (37,90%), diâmetro máximo de partículas 4,8mm e modulo de finura de 3,03 (Tabela 6).

Tabela 6 - Caracterização granulométrica

Peneira (mm)	Resíduo de vermiculita		Areia natural	
	% retida	% retida acumulada	% retida	% retida acumulada
4,8	-	-	3,53	3,53
2,4	-	-	7,04	10,57
1,2	-	-	21,49	32,06
0,6	0,022	0,022	27,80	59,86
0,3	30	30,022	37,9	97,76
0,15	51,61	81,63	2,23	100
FUNDO	18,38	100	-	-
Total	100%	-	100%	-
Dimensão máxima característica (mm):	0,6		4,8	
Módulo de finura:	1,11		3,03	

Também é possível observar que na peneira com abertura de 0,15mm a granulometria da areia natural apresenta-se com apenas 2,23% de concentração de grãos, em relação a vermiculita na mesma dimensão. Diante de tal circunstância optou-se por utilizar como granulometria mais similar a peneira 0,3mm que contém uma quantidade significativa de ambos os grãos retidos acumulados (30% de resíduo de vermiculita e 37,9% de areia natural) já que o objetivo foi substituir parte da areia natural por resíduo de vermiculita.

De acordo com classificação granulométrica apresentada por Lopes Neto (2017), o resíduo de vermiculita pode ser considerado agregado muito fino, por apresentar uma concentração granulométrica na faixa entre 0,15 mm e 0,30 mm, já a areia natural apresenta concentração entre as faixas de 0,30 mm e 0,60 mm, considerada areia fina.

4.1.2. Massa unitária e massa específica do resíduo de vermiculita e areia natural

Os resultados obtidos sobre massa unitária e massa específica do resíduo de vermiculita e areia natural utilizados nesta pesquisa constam na Tabela 7.

Tabela 7 - Massa Unitária e Específica dos materiais

Material	Massa unitária (g/m³)	Massa específica (g/m³)
Resíduo de vermiculita	1,22	3,59
Areia natural	1,55	2,64

O resíduo de vermiculita possui sua massa específica maior que da areia natural, proveniente de um maior teor de finos, confirmando o resultado obtido pela análise granulométrica.

A massa específica do agregado é diretamente proporcional ao teor de finos do material e inversamente proporcional à porosidade da argamassa, ou seja, o maior teor de finos no resíduo de vermiculita pode resultar em argamassas com menor porosidade do que se fossem fabricadas apenas com o agregado natural.

4.1.3. Absorção de água do resíduo de vermiculita e areia natural

Os resultados de absorção de água dos materiais utilizados nesta pesquisa, podem ser observados na tabela 8.

Tabela 8 - Absorção de água dos materiais

Material	Absorção de água (%)
Resíduo de vermiculita	15,29
Areia natural	0,822

É possível concluir que a maior absorção de água do resíduo de vermiculita de (15,29%) quando comparada a areia natural (0,822%) ocorre devido a maior quantidade de finos presentes em sua composição. Cascudo (2017), explica que a absorção de água em relação ao teor de finos, pode ser explicada pelo aumento da superfície específica do material, onde aumento dessa superfície específica propicia maior superfície para adsorção física das moléculas de água.

É importante ressaltar que a água é constituída de moléculas polares, as quais apresentam assimetria na distribuição de cargas elétricas. Carasek et al. (2018), ainda complementam que isto favorece a adsorção de um volume maior de moléculas de água por mecanismos de atração eletrostática, seja ao redor das partículas, seja nas paredes internas dos poros dos grãos maiores.

4.1.4. Inchamento do resíduo de vermiculita

A tensão superficial da água provoca a criação de “meniscos” entre as camadas de água adsorvida do entorno dos grãos, ocasionando assim o afastamento das partículas, o que explica o inchamento (Carasek, 2018). Os resultados obtidos neste teste são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Coeficiente de inchamento do resíduo de vermiculita

Material	Teor de umidade (%)	Coeficiente de inchamento
Resíduo de vermiculita	15,74	1,33

O teor de umidade do resíduo de vermiculita foi de 15,74% e coeficiente de inchamento igual a 1,33. Tal resultado é compreensível devido correlação entre absorção de água do resíduo (citada anteriormente) e umidade. Estes aspectos reforçam a necessidade de uma cautelosa caracterização em relação à absorção de água e teor de finos do agregado.

O elevado coeficiente de inchamento do resíduo de vermiculita pode ser justificado devido à alta força de adesão das moléculas de água às partículas do resíduo, proveniente das características do próprio mineral vermiculita, que se apresenta como micáceo, ou seja, semelhante as argilas.

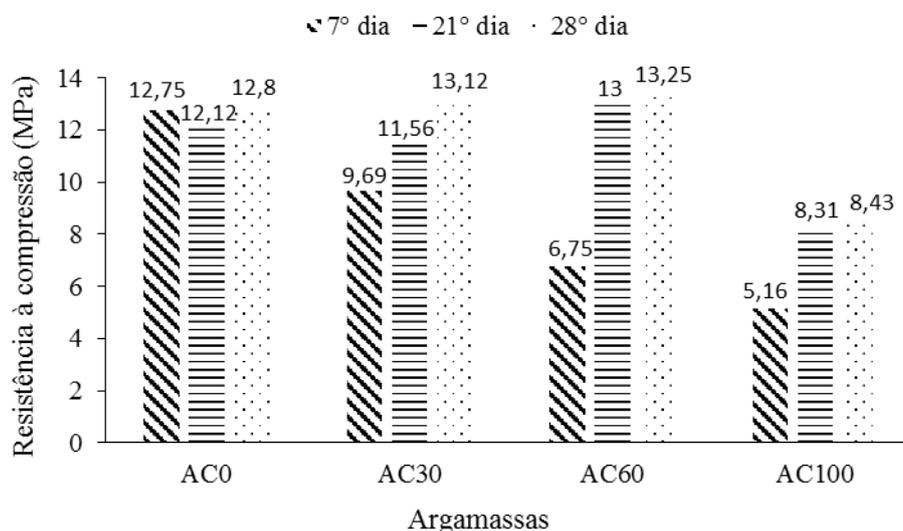
Segundo Carasek (2018), em avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento, o teste de coeficiente de inchamento em agregados reciclados contendo material cerâmico e cimentício apresentou valores entre 1,50 e 1,66, respectivamente, sendo considerados “altos” pelo autor porém, ambos os agregados também obtiveram absorção de água entre 12,01 e 16,58, similar ao ocorrido no presente experimento.

4.2. Ensaios das argamassas no estado endurecido

4.2.1. Resistência à compressão

A resistência à compressão das argamassas está associada à propriedade de durabilidade da mesma e serve como parâmetro comparativo entre os teores de substituição do agregado natural pelo resíduo, em diferentes proporções. Os resultados estão indicados na Figura 27 e Tabela 10.

Figura 27 - Resistência a compressão de argamassas em diferentes dias de cura



No 7º dia de cura, o maior valor de resistência à compressão foi encontrado na argamassa de referência (AC0) com 12,75 MPa. Ao longo do processo de cura a argamassa vai ganhando resistência, como esperado, e no 21º e 28º dias os maiores valores são representados pela argamassa com 60% do teor de substituição (AC60) com 13 e 13,25 MPa, respectivamente.

Higashiyama et al. (2012), justificam essa maior resistência nas argamassas contendo resíduos, devido a quantidade de finos presente no resíduo maior que na areia, melhorando a coesão entre o agregado e a pasta de cimento e, conseqüentemente, sua estrutura de poros.

Outra justificativa para essa maior resistência nas argamassas contendo resíduos, se deve as características mineralógicas do grupo micáceo encontradas no mineral vermiculita, semelhante as argilas, que gera uma maior coesão entre as moléculas de água e as partículas de resíduo e do cimento, proporcionando uma maior resistência à compressão.

Para melhor entendimento, na Tabela 10 constam todos os valores de resistência à compressão obtidos durante o experimento, juntamente com a comparação de médias entre as diferentes proporções para cada dia de cura e entre aos dias de cura na mesma proporção, realizada através do teste de médias do programa R Development Core Team (2011).

Tabela 10 - Resistência à compressão das argamassas em diferentes dias de cura

Teor de substituição	Resistência à compressão (MPa)			P-Valor
	Tempo de cura			
	7 dias	21 dias	28 dias	
AC0	12,75 ± 2,22 A	12,12 ± 1,02 A	12,8 ± 1,06 A	0,787
AC30	9,69 ± 1,55 AB	11,56 ± 2,30 A	13,12 ± 1,43 A	0,069
AC60	6,75 ± 0,96 bBC	13 ± 0,82 aA	13,25 ± 0,50 aA	0,000
AC100	5,16 ± 0,57 bC	8,31 ± 0,55 aB	8,43 ± 0,82 aB	0,000

Médias seguidas de mesma letra minúscula (na linha) e maiúscula (na coluna), não diferem entre si (R Development Core Team, 2011).

Considerando a diferença média em cada proporção é possível concluir que AC0 e AC30 são consideradas estatisticamente iguais em todos os dias de cura. Já AC60 e AC100 diferem no 7º dia de cura e mantém a igualdade no 21º e 28º dias de cura. Portanto, AC60 e AC100 ao 21º dia de cura apresentam a mesma resistência à compressão quando comparada ao 28º dia de cura, que em obra diminui o tempo de cura da argamassa para uma mesma resistência, reduzindo tempo e custos.

Em relação aos dias de cura, no 7º dia as composições apresentaram igualdade estatística, onde AC0 se iguala a AC30, que por sua vez se iguala com AC60 e este com AC100. Este comportamento pode ser justificado pelo início do ganho de resistência, onde cada argamassa começa a apresentar suas reações em função da quantidade de resíduo em sua composição e ao longo do processo de cura se tornam mais característicos em relação a sua composição, onde ao 21º e 28º dias de cura AC0, AC30 e AC60 são consideradas estatisticamente iguais. Apenas AC100 não apresenta igualdade com as demais, proveniente ao seu fator água/ aglomerante que comprometeu a resistência nesta proporção, resultado semelhante encontrado por Forti (2017), que associa essa menor resistência a uma maior plasticidade em consequência da maior quantidade de água (fator água/aglomerante), que neste estudo apresentou-se com 0,85, valor necessário para se conseguir chegar a mesma trabalhabilidade alcançada nas demais composições.

De forma geral, todas as composições obtiveram valores de resistência à compressão que se enquadram em conformidade e satisfação às exigências mecânicas expostas na NBR 13281 (Tabela 11), com identificação classe III, por apresentar resistência aos 28 dias superior a 8,0MPa. Em relação aos resultados da análise estatística, AC60 apresenta-se como a melhor proporção, contendo a maior quantidade de resíduos em sua composição, dentre as melhores resistências (AC0, AC30 e AC60). Quanto a potencialidade dos resultados, AC60 apresenta uma elevada resistência à compressão, sendo relevante seu uso como argamassa de assentamento ou como blocos de fechamento para edificações.

Tabela 11 - Exigências mecânicas descritas na NBR 13281

Características	Identificação	Limites
Resistência à compressão aos 28 dias (MPa)	I	$\geq 0,1$ e $< 4,0$
	II	$\geq 4,0$ e $\leq 8,0$
	III	$> 8,0$

4.2.1.1. Eficiência do ensaio de resistência à compressão

Após o ensaio de resistência à compressão foi necessário avaliar a eficiência do mesmo. A Tabela 12 apresenta os resultados e seus respectivos níveis para cada composição de argamassa produzida nos diferentes dias de cura.

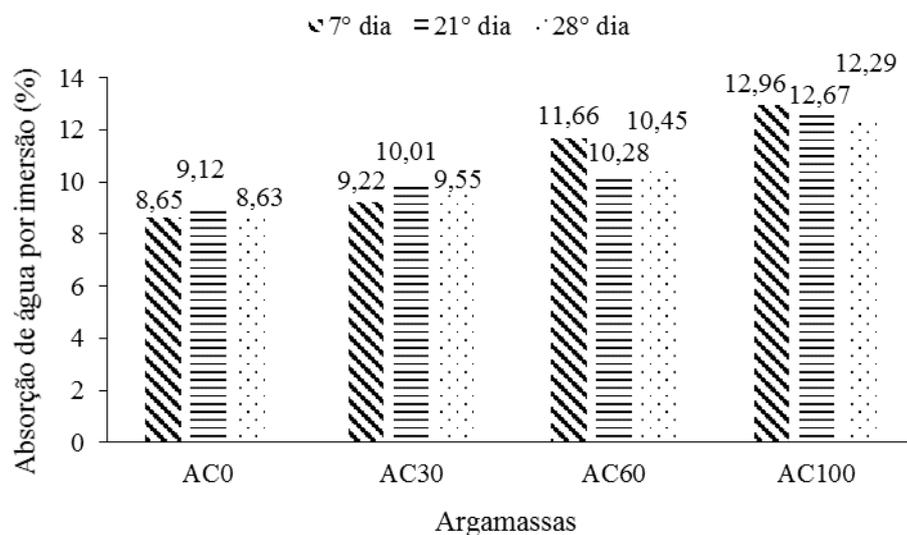
Tabela 12 - Eficiência do ensaio de resistência à compressão

Teor de substituição	Eficiência do ensaio					
	7° dia de cura		21° dia de cura		28° dia de cura	
	Coefficiente de variação	Avaliação	Coefficiente de variação	Avaliação	Coefficiente de variação	Avaliação
AC0	0,48	Excelente	0,48	Excelente	0,48	Excelente
AC30	0,48	Excelente	0,48	Excelente	0,48	Excelente
AC60	0,48	Excelente	0,48	Excelente	0,48	Excelente
AC100	0,48	Excelente	0,48	Excelente	0,48	Excelente

A partir da Tabela 12, foi possível compreender que o ensaio de resistência à compressão apresentou coeficiente de variação de 0,48 em todas as diferentes argamassas (AC0, AC30, AC60 e AC100) e em todos os dias de cura (7, 21 e 28), significando assim, eficiência classificada como excelente e representada pelo nível 1, o que condicionou confiabilidade ao experimento.

4.2.2. Absorção de água por imersão

As argamassas produzidas com resíduo, de forma geral, apresentaram maiores índices de absorção por imersão. Os resultados para os ensaios de absorção de água por imersão estão indicados na Figura 28 e Tabela 13.

Figura 28 - Absorção de água por imersão de argamassas em diferentes dias de cura

Ao analisar a Figura 28, é notório o aumento gradativo da absorção de água à medida que a porcentagem do agregado natural é substituído por resíduo de vermiculita. O estudo desenvolvido por Medeiros (2016) sobre argamassas de revestimento com resíduo de scheelita, apresentou similaridade com os resultados obtidos neste experimento, o autor explica que, a medida que se aumenta o teor de substituição de areia natural por resíduo, aumenta também a absorção por imersão, por exemplo para 0% obteve 13,22% de absorção e em 100% de substituição 13,97%. O mesmo justifica que essa característica indica que as amostras com maior quantidade de resíduo, possuem mais poros permeáveis que as amostras fabricadas apenas com areia natural como agregado e por isso tendem a absorver mais água.

Para melhor compreensão, na Tabela 13 constam todos os valores de absorção por imersão com a comparação de médias entre as diferentes proporções para cada dia de cura e entre aos dias de cura na mesma proporção, realizada através do teste de médias do programa R Development Core Team (2011).

Tabela 13 - Absorção de água por imersão das argamassas em diferentes dias de cura

Teor de substituição	Absorção por imersão (%)			P-Valor
	7 dias	21 dias	28 dias	
AC0	8,65 ± 0,10 C	9,12 ± 0,31 C	8,63 ± 0,93 D	0,073
AC30	9,22 ± 2,56 bBC	10,01 ± 0,34 aB	9,55 ± 0,30 aC	0,760

AC60	11,66 ± 0,27 aAB	10,28 ± 0,38 bB	10,45 ± 0,23 bB	0,000
AC100	12,96 ± 0,19 aA	12,67 ± 0,30 abA	12,29 ± 0,22 bA	0,011

Médias seguidas de mesma letra minúscula (na linha) e maiúscula (na coluna), não diferem entre si (R Development Core Team, 2011).

Levando em consideração a diferença média em cada proporção é possível observar que os resultados de absorção em AC0 são considerados iguais em todos os dias de cura. AC30 e AC60 possuem igualdade estatística no 21º e 28º dias de cura e AC100 igualdade no 7º e 21º dias de cura. A justificativa para maior absorção de água nos primeiros dias de cura, encontrados em AC60 e AC100, é que a incorporação de resíduos de vermiculita em maiores quantidades promove uma maior absorção inicial, devido a quantidade de poros permeáveis que em seguida diminuem a absorção por não sobrar mais espaço entres os mesmos.

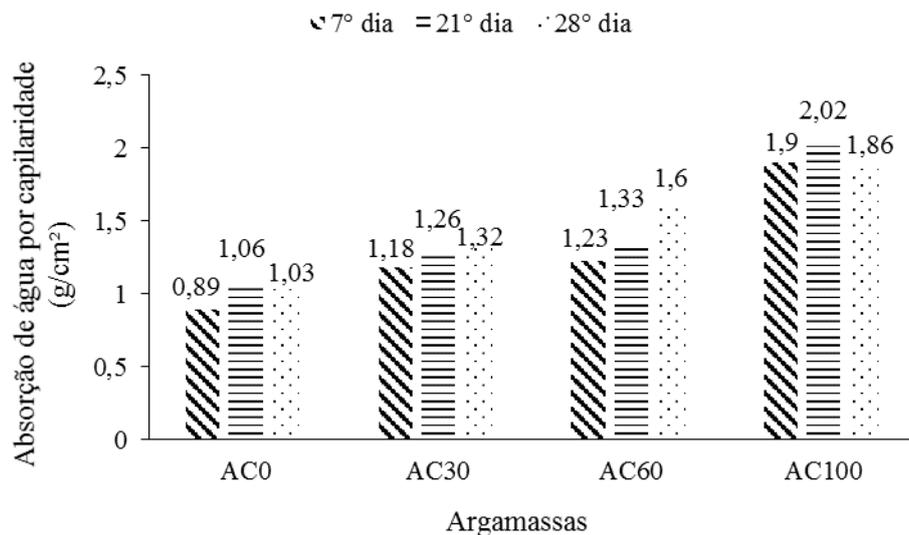
Considerando os dias de cura, no 7º dia as proporções apresentam igualdade estatística entre AC0 e AC30, AC30 e AC60 e AC60 e AC100, comportamento justificado pelo início da absorção, onde cada proporção começa a apresentar suas reações em função da quantidade de resíduos de vermiculita. No 21º dia de cura os resultados de absorção indicam igualdade estatística entre AC30 e AC60. Já AC0 e AC100 não apresentam igualdade possivelmente devido a composição da argamassa (sem resíduo) e pelo alto teor de substituição de areia natural por resíduo de vermiculita, respectivamente. Por fim, ao 28º dia de cura nenhuma das proporções apresentaram igualdade estatística, possivelmente devido ao fato de que cada proporção tem suas características bem definidas a partir da quantidade de teor de substituição, onde a medida que se aumentava a quantidade de resíduo de vermiculita na composição da argamassa, aumentava também a absorção por imersão.

De modo geral, todas as diferentes proporções de argamassas estudadas apresentaram valores similares aos estudos de referência, como os de Silva et al. (2013) e Medeiros (2016) que avaliaram argamassas de revestimento contendo resíduos minerais. Diante dos resultados obtidos, AC100 apresenta-se como a melhor proporção, por apresentar maior absorção de água por imersão, indicando ter uma maior condutividade térmica e uma menor resistência como foi comprovado anteriormente nos resultados de resistência à compressão, além de ser a proporção com maior quantidade de resíduos.

4.2.3. Absorção de água por capilaridade

Os resultados obtidos neste ensaio constam na Figura 29 e Tabela 14.

Figura 29 - Absorção de água por capilaridade das argamassas com substituição em diferentes dias de cura



Os resultados demonstram que a absorção de água por capilaridade aumenta em função da quantidade de resíduo presente na composição da argamassa, ou seja, quanto maior o teor de substituição de areia natural por resíduo de vermiculita, maior a absorção.

Na Tabela 14 constam ainda os valores de absorção por capilaridade com a comparação de médias entre as diferentes proporções para cada dia de cura e entre aos dias de cura na mesma proporção.

Tabela 14 – Absorção de água por capilaridade das argamassas em diferentes dias de cura

Teor de substituição	Absorção por capilaridade (g/ cm ²)			P-Valor
	Tempo de cura			
	7º dia	21º dia	28º dia	
AC0	0,89 ± 0,03 A	1,06 ± 0,14 B	1,03 ± 0,08 C	0,065
AC30	1,18 ± 0,18 B	1,26 ± 0,22 B	1,32 ± 0,21 BC	0,628
AC60	1,23 ± 0,21 B	1,33 ± 0,19 B	1,60 ± 0,20 AB	0,067
AC100	1,90 ± 0,20 B	2,02 ± 0,34 A	1,86 ± 0,20 A	0,678

Médias seguidas de mesma letra maiúscula (na coluna), não diferem entre si (R Development Core Team, 2011).

Considerando a diferença média em cada proporção, conforme Tabela 14, estatisticamente os valores não diferem entre si em todos os dias de cura (7, 21 e 28), tal circunstância ocorreu em todas as proporções (AC0, AC30, AC60 e AC100). Com isso é possível afirmar que ao 7º dia de cura as argamassas têm a mesma absorção a capilaridade que aos 21 e 28 dias de cura, que em obra reduz tempo e custos.

Em relação aos dias de cura, ao 7º dia o AC0 não apresenta igualdade estatística com as demais proporções, que se igualam, demonstrando que a introdução do resíduo de vermiculita na composição da argamassa influenciou nos resultados de absorção por capilaridade e que não houve variação destes resultados perante a quantidade de resíduos aplicado. No 21º dia de cura AC0, AC30 e AC60 são consideradas estatisticamente iguais, apenas AC100 diverge das outras proporções, ou seja, após 21 dias de cura não houve diferença entre as argamassas sem ou com resíduo em sua composição, com exceção de AC100 que devido a uma maior quantidade de resíduo absorveu mais água. Já no 28º dia de cura as proporções apresentam igualdade estatística de AC0 com AC30, AC30 com AC60 e AC60 com AC100.

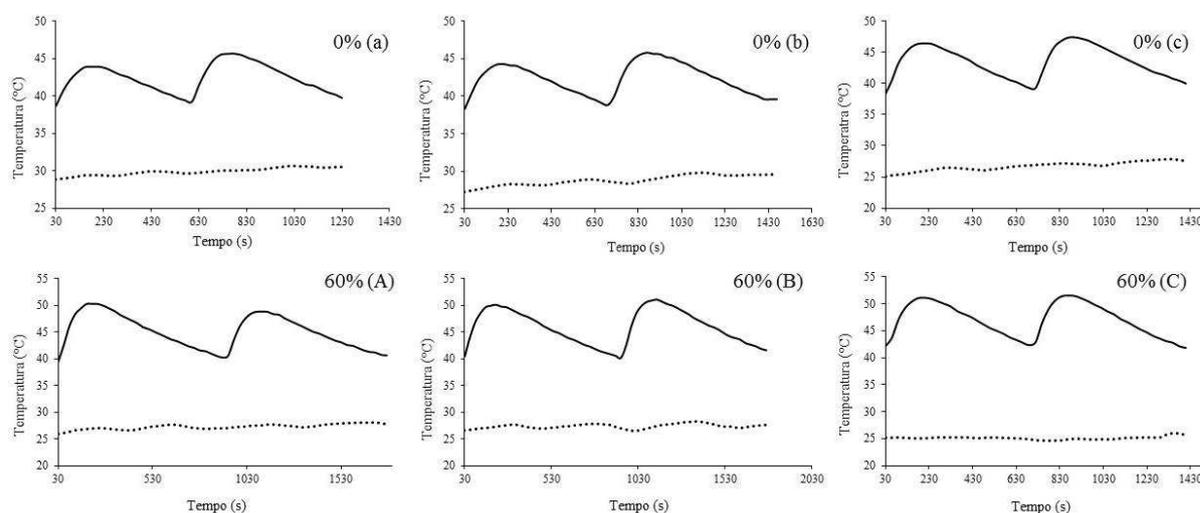
Araújo (2017) em estudos com argamassa, obteve valores de absorção por capilaridade entre 1,20 e 1,79 g/m³, semelhantes aos resultados obtidos no atual experimento (entre 0,89 e 2,02 g/m³), outra observação similar encontrada foi que ao aumentar o teor de substituição, aumentava a absorção por capilaridade. Conforme Metha e Monteiro (2008), a água que não é utilizada na hidratação dos compostos cimentícios, evapora-se dando origem aos vazios capilares. Porém segundo Corinaldesi (2012) este comportamento no aumento desta condição pode ser vantajoso em termos de uma drenagem eficaz da umidade presente dentro da argamassa.

Considerando que todas as proporções não divergem estatisticamente entre os dias de cura, e levando em consideração as diferenças entre as proporções para um mesmo dia de cura. Portanto, avaliando os dias de cura, o mais indicado é o 7º dia devido as características expressivas nos resultados que apontam a influência da utilização do resíduo de vermiculita em relação a absorção por capilaridade quando comparada a AC0, e dentre as demais proporções a mais indicada foi a que utilizou a maior quantidade de resíduo, neste caso AC100.

4.3. Comportamento térmico das placas de argamassa

As placas de argamassa de referência (PAC0) com 0% de teor de substituição do agregado por resíduo de vermiculita e placas de argamassa com 60% de teor de substituição (PAC60), apresentaram curvas de temperatura com comportamento semelhante (Figura 30), caracterizado por dois ciclos, cada um destes representado por um aumento e declínio de temperatura, ilustrados por uma linha contínua (face interna da placa, exposta ao calor) e linha pontilhada (face externa, da placa exposta ao ambiente controlado).

Figura 30 - Comportamento das curvas de temperatura apresentados pelas placas de argamassa



Na Figura 30 é possível observar a similaridade em todos os testes com as diferentes placas de argamassa. O comportamento dos ensaios se caracterizou em dois ciclos, onde a face da placa de argamassa exposta ao calor (representada pela linha contínua) apresenta mais expressividade para essa compreensão, já que a face exposta ao ambiente controlado (linha pontilhada) se manteve mais constante (sem grandes oscilações de temperatura).

Em seguida, foi possível definir os gradientes médios de temperatura (máximas e mínimas) durante todo o processo de coleta de dados (envolvendo o aumento e declínio das temperaturas) para cada placa (Tabela 15).

Tabela 15 - Gradientes térmicos (máximos e mínimos) das placas de argamassa

Teor de substituição	Gradiente térmico		
	$\Delta_{\text{máx}}$ (°C)	$\Delta_{\text{mín}}$ (°C)	
PAC0	a	37,17	34,68
	b	36,76	34,14
	c	36,70	33,44
	Médias	36,88	34,07
PAC60	a	38,39	33,73
	b	38,97	34,10
	c	38,13	33,63
	Médias	38,49	33,82

Conforme Tabela 15 o valor médio para as três placas de cada proporção em cada um dos gradientes, PAC0 $\Delta_{\text{máx}}= 36,88$ °C e $\Delta_{\text{mín}}= 34,08$ °C e PAC60 $\Delta_{\text{máx}}= 38,50$ °C e $\Delta_{\text{mín}}= 33,82$ °C.

Percebe-se que PAC60 apresentou melhor comportamento térmico levando em consideração um maior gradiente térmico entre as diferentes faces (representado pelos gradientes máximos e mínimos) que representa 60% quando comparada a PAC0. Ou seja, a composição da placa (quanto à incorporação de vermiculita) influenciou positivamente numa maior variação de temperatura entre as faces da placa. Tal comportamento pode ser justificado pelas características físicas do resíduo de vermiculita, que se apresenta como muito fino e tendeu a absorver mais água, a partir dos testes de absorção, indicando possuir mais espaços vazios (ar) tendo assim favorecido a melhoria no isolamento térmico da argamassa, quando comparada à que não contém o resíduo.

Leal (2012) com estudo sobre o desenvolvimento de argamassas de revestimento com comportamento térmico melhorado e Gomes et al. (2017) que analisaram a influência do teor de umidade na condutividade térmica de argamassas térmicas externas, puderam concluir que a condutividade térmica de agregados finos é afetada pelo tamanho dos poros e estrutura interna, porém ambas as situações levam a uma baixa condução, e ainda ressaltam que quanto mais fino e menor a dimensão dos poros, menor é a condutibilidade térmica.

Essa conclusão citada pelos autores serve como parâmetro para interpretação dos resultados obtidos neste experimento, onde a pequena dimensão do grão do resíduo de vermiculita presente nas PAC60 proporcionou um maior número de microporos e conseqüentemente um menor comportamento térmico, comprovado a partir de um maior gradiente térmico (diferença entre a maior e menor temperatura) entre as faces das placas de argamassa.

5. CONCLUSÃO

Conclui-se que:

O resíduo de vermiculita possui uma maior quantidade de finos, maior massa específica e absorção de água quando comparada a areia natural, utilizada na produção das argamassas convencionais.

No estado endurecido, quanto a resistência à compressão, a argamassa que continha 60% do teor de substituição de areia natural por resíduo de vermiculita alcançou maiores valores de resistência quando comparada a argamassa de referência (sem adição do resíduo), sendo possível concluir que a adição de resíduo de vermiculita na composição de argamassa melhora sua resistência mecânica à compressão.

Nos ensaios, tanto de absorção quanto por imersão e por capilaridade, a maior absorção foi na argamassa que continha 100% de teor de substituição de areia natural por resíduo. Assim, a adição de resíduo de vermiculita na composição de argamassa, melhora suas propriedades físicas como absorção por imersão e por capilaridade.

Na análise do comportamento térmico, a argamassa com adição de resíduo de vermiculita é a mais indicada para utilização em superfícies que recebem maior incidência de raios solares, devido ao seu melhor desempenho térmico em torno de 60% quando comparada a argamassas de referência (sem adição do resíduo), contribuindo assim, para um melhor conforto térmico nos ambientes internos de uma edificação.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13281: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Requisitos. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 13529: Revestimento de paredes e tetos de argamassas inorgânicas - Terminologia. Rio de Janeiro, 2013.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15220: Desempenho Térmico de Edificações. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 248: Agregados-Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 45: Agregados-Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 52: Agregado miúdo-Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR NM 30: Agregado miúdo-Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6467: Determinação do inchamento do agregado. Rio de Janeiro, 2006.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7215: Cimento Portland – Resistência á compressão. Rio de Janeiro, 1996.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 5739: Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 9779: Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 1995.

Alencar, A. C. A. B.; Costa, T. P. G da; Alves, C. S.; Linhares, F. M. Diagnóstico espaço-temporal das áreas impactadas pela MPL - Mineração Pedra Lavrada (Santa

Luzia-PB), na extração de vermiculita. *Revista Brasileira de Gestão Ambiental e Sustentabilidade*: 2(2): 25-36, 2015.

Araújo, Regina Célia Lopes; Rodrigues, Edmundo Henrique Ventura; Freitas, Edna das Graças Assunção. *Materiais de construção*. Seropédica: Editora Universidade Rural, 2000. 209 p.

Araújo, E. R.; Oliveira, R. D.; Fernandes, F. R. C. Atividade mineradora gera riqueza e impactos negativos nas comunidades e no meio ambiente. In: Francisco Rego Chaves Fernandes (Ed.). *Recursos Minerais e Comunidade: impactos humanos - socioambientais - econômicos*. Rio de Janeiro: CETEM, 2014. p. 1-12.

Araújo, R. A. Influência da utilização de resíduo de cerâmica vermelha nas propriedades de argamassas mistas. 2017. 82 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

Carasek, H.; Girardi, A. C. C.; Araújo, R. C.; Angelim, R.; Cascudo, C. Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. *Cerâmica*, v. 64, p. 288-300, 2018.

Carvalhoes, C., R. Vermiculita. DNPM — Departamento Nacional de Produção Mineral. *Sumario mineral 2015*, v. 35, Brasília, 2015.

Cascudo, O. in *Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais*, Vol. 1, IBRACON, S. Paulo (2017) 143.

Corinaldesi, V. Environmentally-friendly bedding mortars for repair of historical buildings. *Construction And Building Materials*. v. 35, p. 788-784, 2012.

Cunha, S.; Aguiar, J. B.; Tadeu, A. Thermal performance and cost analysis of mortars made with PCM and different binders. *Construction and Building Materials*. v. 122, p. 637–648, 2016.

DNPM - Departamento Nacional de Produção Mineral. *Sumário Mineral 2012*. Brasília: DNPM, 2012. 136p.

DUPRÉ MINERALS. What is vermiculite? Disponível em: <<http://www.dupreminerals.com/en/vermiculite/introduction>>. Acesso em: 13 fev. 2017.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Curso de recuperação de áreas degradadas. A visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo,*

indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2008.

Fajardo, L. O declínio da mineração e seu legado na América Latina. BBC Mundo. Disponível em: <<http://www.bbc.com/portuguese/noticias>>. Acesso em: 18 out. 2015.

Fontes, C. W., Mendes J. C.; Silva, S. N. da; Peixoto, R. A. F. Mortars for laying and coating produced with iron ore tailings from tailing dams. *Construction and Building Materials*, v. 112, p. 988–995, 2016.

Fontes, W.C.; Pereira, A. C. P.; Chibli, P. A.; Bastos, L. A. de C.; Brigolini, G. J.; Peixoto, R. A. F. Utilização de rejeito de barragem de minério de ferro como agregado reciclado para argamassas. X Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Fortaleza/CE, 2013.

Forti, E. Z. Influência da cal hidratada nas características da argamassa de revestimento realizada em obra. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharelado em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Taquari, Lajeado, 2017.

França, S. C. A.; Luz, A.B. Utilização da vermiculita como adsorvente de compostos orgânicos poluentes da indústria do petróleo. In Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. p. 547-553, Recife, 2002.

França, S. C. A.; Braga, P. F. A.; Couto, H. J. B.; Gonçalves, C. C. Vermiculita, mais que um mineral termo acústico. In: Rio de Janeiro. Francisco Wilson Holanda Vidal. (Org.). ANAIS: IV Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste. João Pessoa: CETEM, 2016. p. 126-136.

Gomes, G. M.; Flores-Colen, I.; Manga, L. M.; Soares, A.; de Brito, J. The influence of moisture content on the thermal conductivity of external thermal mortars. *Construction and Building Materials*. v. 135, p. 279–286. 2017.

Guacelli, P.A.G.; Risson, K.D.B.S.; Carbonari, B.M.T. Substituição de areia de extração por areia de britagem para argamassa de revestimento. XI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Porto Alegre/RS, 2015.

Hashem, F.S., Amin, M.S., El-Gamal, S.M.A. Chemical activation of vermiculite to produce highly efficient material for Pb²⁺ and Cd²⁺-removal. *Applied Clay Science*, v. 115, p. 189-200, 2015.

Higashiyama, H.; Sappakittipakorn, M.; Sano M.; Yagishita F. Chloride ion penetration into mortar containing ceramic waste aggregate. *Construction and Building Materials*, v. 33, p. 48-54, 2012.

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. II Inventário de Gases Efeito Estufa do Setor Mineral. Brasília/DF: Instituto Brasileiro de Mineração – IBRAM, 2014.

Laurent, A., Bakas, I., Clavreul, J., Bernstad, A., Niero, M., Gentil, E., Hauschild, M. Z., & Christensen, T. H. Review of LCA studies of solid waste management systems – part I: lessons learned and perspectives. *Waste Management*, 34(3), 573-588, 2014.

Leal, M. M. R. Desenvolvimento de argamassas de revestimento com comportamento térmico melhorado. 2012. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Construção Civil, Instituto Politécnico de Setúbal, Setúbal, 2012.

Lewandowski, W. M.; Lewandowska-Iwaniak, W. The external walls of a passive building: A classification and description of their thermal and optical properties. *Energy and Buildings*. v. 69, p. 93–102, 2014.

Lopes Neto, J. P. Construções e Instalações Rurais. NT editora. Brasília – DF. ISBN: 978-85-8416-165-2, 2017.

Medeiros, M. Estudo de argamassas de revestimento com resíduo de scheelita. 88 f. Tese (Mestrado) – Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

Mehta, P. K. Monteiro, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: Ibracon, 2008. 674 p.

NTC BRASIL. Vermiculita Expandida. Disponível em: <<https://www.ntcbrasil.com.br/outros/vermiculita-expandida>>. Acesso em: 13 fev. 2017.

Pivotto, E.; Abreu, A.G. Estudo de areia de rejeito basáltico para produção de argamassas. XI Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Porto Alegre/RS, 2015.

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos. Congresso. Câmara dos Deputados. Constituição (2012). Política Nacional nº 54, de 18 de maio de 2012. Lei Nº 12.305, de 2 de Agosto de 2010: Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. 2. ed. Brasília, DF: Edições Câmara, p. 7-41, 2012.

R Development Core Team (2011). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.

Rashad, A. M. Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer. *Construction and Building Materials*. 125, 53–62, 2016.

Raut, A. N. Gomez, C. P. Thermal and mechanical performance of oil palm fiber reinforced mortar utilizing palm oil fly ash as a complementary binder. *Construction and Building Materials*. v. 126, p. 476-483, 2016.

Recena, F. A. P. *Conhecendo Argamassa*. 2. ed. Rio Grande do Sul: Edipucrs, 188 p, 2012.

Reis, E *Levantamento da Situação e das Carências Tecnológicas dos Minerais Industriais Brasileiros. Com enfoque na mineração de: Argila para cerâmica, Barita, Bentonita, Caulim para carga, Talco / Agalmatolito e Vermiculita*. Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) / Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), 2001.

Reis, E. *Vermiculita no Brasil – Situação atual*. Ministério de Ciência e Tecnologia (MCT) / Centro de Gestão e Estudos Estratégicos (CGEE), 2002.

Ribeiro, D.; Moura, L. S. de; Pirote, N. S. dos. Sustentabilidade: Formas de Reaproveitar os Resíduos da Construção Civil. *Revista de Ciências Gerenciais*, São Paulo, v. 20, n. 31, p.41-45, 2016.

Rufino, E. S.; Galdino, A. G. S. Avaliação das propriedades físico-mecânicas de argamassa com utilização de resíduos de fundição. *Cerâmica*, [s.l.], v. 61, n. 360, p.428-434, dez. 2015.

Santamaría-Vicario, I.; Rodríguez, A.; Gutiérrez-González, S.; Calderón, V. Design of masonry mortars fabricated concurrently with different steel slag aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 95, p. 197-206, 2015.

Santos, M. R. dos. Valorização de resíduos como abordagem de ecoeficiência em termelétricas: o caso das cinzas pesadas de carvão mineral. 207 f. Tese (Doutorado) - Curso de Administração, Programa de Pós- Graduação em Administração, Universidade Nove de Julho, São Paulo, 2015.

Silva, A. P. M.; Viana, J. P.; Cavalcante, A. L. B. *Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas*. Brasília: IPEA, 2012.

Silva, N.S.; Silva, G.G.; Gleize, P.J.P. Argamassa de revestimento utilizando areia residual proveniente da produção de minérios. X Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas. Fortaleza/CE, 2013.

Sznelwar, J. J., Scalabrin, R. Relatório Técnico 48 Perfil da Vermiculita. Ministério de minas e energia – MME. Secretaria de geologia, mineração e transformação mineral-SGM, 2009.

Tanner, A. O. (Eua) (Org.). Vermiculite: Data in thousand metric tons unless otherwise noted. In: EUA. U.s. Department Of The Interior. U.s. Geological Survey (Org.). MINERAL COMMODITY SUMMARIES 2016. Virginia: Usgs, 2016. p. 184, 2016.

Ugarte, J. F. O.; Monte, M. B. M.; França, S. C. A. e Graiciano, F. P. R. Comparação estatística do fator de expansão de concentrados de vermiculita. In: XX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa. Vol. 1, p. 201-208, Florianópolis, 2004

Ugarte, J. F. O.; Sampaio, J. A.; França, S. C. A.. Vermiculita. IN: Rochas e Minerais Industriais no Brasil: usos e especificações. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, p. 865-887, 2008.

UNESP. Vermiculita. Disponível em:
<<http://www.rc.unesp.br/museudpm/banco/silicatos/filossilicatos/vermiculita.html>>.
Acesso em: 13 fev. 2017.

Xu, S.; Wang, I.; Jiang, Q.; Zang, S. Study of natural hydraulic lime-based mortars prepared with masonry waste powder as aggregate and diatomite/fly ash as mineral admixtures. Journal of Cleaner Production. V. 199, p. 188-127, 2016.