



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

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE VERMICULITA EM
ARGAMASSA ALTERNATIVA PARA A PRODUÇÃO DE
LADRILHO HIDRÁULICO**

Alicia Nayana dos Santos Lima de Brito

Campina Grande - PB

2021

**APROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE VERMICULITA EM ARGAMASSA
ALTERNATIVA PARA A PRODUÇÃO DE LADRILHO HIDRÁULICO**

Alicia Nayana dos Santos Lima de Brito

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.

Julho - 2021

B862a Brito, Alcía Nayana dos Santos Lima de.
Aproveitamento de resíduo de vermiculita em argamassa alternativa para a produção de ladrilho hidráulico / Alcía Nayana dos Santos Lima de Brito. – Campina Grande, 2022.
91 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2021.
"Orientação: Prof. Dr. José Pinheiro Lopes Neto".
Referências.

1. Construções Rurais e Ambiência. 2. Materiais Alternativos. 3. Sustentabilidade. 3. Rejeitos. 4. Pisos. 5. Mineral. I. Lopes Neto, José Pinheiro. II. Título.

CDU 631.21:502.131.1 (043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA AGRICOLA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

ALÍCIA NAYANA DOS SANTOS LIMA DE BRITO

APROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE VERMICULITA EM ARGAMASSA ALTERNATIVA PARA A PRODUÇÃO DE LADRILHO HIDRÁULICO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola como pré-requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

Aprovada em: 28/07/2021

José Pinheiro Lopes Neto – Orientador – UAEA/CTRN/UFCG

José Wallace Barbosa do Nascimento – Examinador Interno - UAEA/CTRN/UFCG

Fernanda Fernandes de Melo Lopes - Examinadora Externa - CCA/UFPB



Documento assinado eletronicamente por **Fernanda Fernandes de Melo, Usuário Externo**, em 04/08/2021, às 10:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE WALLACE BARBOSA DO NASCIMENTO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/08/2021, às 08:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE PINHEIRO LOPES NETO, PROFESSOR 3 GRAU**, em 09/08/2021, às 13:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>,



informando o código verificador **1679074** e o código CRC **686355A1**.

Referência: Processo nº 23096.045000/2021-55

SEI nº 1679074



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA AGRICOLA
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

REGISTRO DE PRESENÇA E ASSINATURAS

**ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO PARA CONCESSÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA AGRÍCOLA, REALIZADA EM 28 DE JULHO DE 2021.**

(Nº 672)

CANDIDATO(A): **ALÍCIA NAYANA DOS SANTOS LIMA DE BRITO**

COMISSÃO EXAMINADORA: José Pinheiro Lopes Neto – Orientador – UAEA/CTRN/UFCG; José Wallace Barbosa do Nascimento – Examinador Interno - UAEA/CTRN/UFCG; e Fernanda Fernandes de Melo Lopes - Examinadora Externa - CCA/UFPB (PORTARIA PPGEA - MS 10/2021)

TÍTULO: APROVEITAMENTO DE RESÍDUO DE VERMICULITA EM ARGAMASSA ALTERNATIVA PARA A PRODUÇÃO DE LADRILHO HIDRÁULICO

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Construções Rurais e Ambiência

LOCAL: Por Videoconferência (plataforma Google Meet) em virtude da suspensão de atividades na UFCG decorrente do corona vírus (COVID-19)

HORÁRIO: 8h30

Em sessão pública, após exposição de cerca de 50 minutos, o(a) candidato(a) foi arguido(a) oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua Dissertação, sendo **APROVADO(A)**, com modificações no texto, de acordo com as exigências da Comissão Examinadora, que deverão ser cumpridas no prazo máximo de 30 (trinta) dias. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata, que é assinada por ROBERTO ROMAN DOS SANTOS (secretário do PPGEA) e demais membros da Comissão Examinadora presentes. Campina Grande/PB, 28 de julho de 2021.

Roberto Roman dos Santos - Secretário do PPGEA/UFCG

José Pinheiro Lopes Neto – Orientador – UAEA/CTRN/UFCG

José Wallace Barbosa do Nascimento – Examinador Interno - UAEA/CTRN/UFCG

Fernanda Fernandes de Melo Lopes - Examinadora Externa - CCA/UFPB

Alícia Nayana dos Santos Lima de Brito - Discente

1. Segue a presente Ata de Defesa de Dissertação do(a) candidato(a) **ALÍCIA NAYANA DOS SANTOS LIMA DE BRITO**, assinada eletronicamente pela Comissão Examinadora acima identificada.
2. No caso de examinadores externos que não possuam credenciamento de usuário externo ativo no SEI, para igual assinatura eletrônica, os examinadores internos signatários certificam que os examinadores externos acima identificados participaram da defesa da dissertação e tomaram conhecimento do teor deste documento.

JULHO DE 2021



Documento assinado eletronicamente por **ALÍCIA NAYANA DOS SANTOS LIMA DE BRITO, Usuário Externo**, em 03/08/2021, às 16:30, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Fernanda Fernandes de Melo, Usuário Externo**, em 04/08/2021, às 10:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE WALLACE BARBOSA DO NASCIMENTO, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 09/08/2021, às 08:54, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **ROBERTO ROMAN DOS SANTOS, SECRETARIO**, em 09/08/2021, às 10:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE PINHEIRO LOPES NETO, PROFESSOR 3 GRAU**, em 09/08/2021, às 13:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **1679039** e o código CRC **E2A67E58**.

Aos meus pais, Antonio Lima de Brito e
Rosinete dos Santos Lima de Brito, por todo
apoio, amor e carinho!

Deus seja louvado!

AGRADECIMENTOS

A Deus e a Nossa Senhora toda honra e toda glória, por proporcionar a realização de mais um sonho, fazendo-se cumprir mais uma etapa primordial em minha vida.

Aos meus pais, Antonio e Rosinete, que me ensinaram a ser persistente e jamais desistir de ir em busca dos meus objetivos, de maneira correta e íntegra. Ao meu irmão, Alison, e a todos os familiares, pelo apoio e carinho, que foram essenciais para a concretização deste ciclo. Ao meu avô José Pedro (*in memoriam*) que, mesmo sem ter fisicamente sua presença, vive forte em meu coração, guiando-me e me protegendo. Ao meu noivo, Bruno Rosendo, por todo amor e cumplicidade durante todos os momentos.

Ao meu orientador, José Pinheiro Lopes Neto, pela paciência, ensinamentos e contribuições, que tão bem me auxiliou em todas as etapas para a realização deste trabalho.

À professora, Fernanda Fernandes de Melo Lopes, que sempre me impulsionou e ajudou desde os tempos da graduação, agradeço por todo apoio e amizade, como também por ser um exemplo de profissional a ser seguido.

A todos os professores e colaboradores que fazem parte do Laboratório de Construções Rurais e Ambiente, por todo compartilhamento de conhecimentos durante o mestrado.

Meu especial agradecimento aos amigos do mestrado, Airton Gonçalves, Karoline Dornelas, Renata Dias, Nágela Mascarenhas e aos demais colegas, pela amizade, bons momentos e o auxílio sempre que solicitado. Às minhas amigas da vida, que estiveram comigo, apoiando-me e me incentivando a sempre seguir em frente, em especial, Laysa Gabryella, Dinah Castro, Hortência Couras, Julya Rachel, entre outros.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola/UFMG por me possibilitar a realização de cursar o mestrado em Construções Rurais e Ambiente, bem como a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de estudos concedida.

Por fim, a todos que, direta ou indiretamente, auxiliaram-me na realização deste trabalho. Meu muito obrigada!

BRITO, Alícia Nayana dos Santos Lima de. **Aproveitamento de resíduo de vermiculita em argamassa alternativa para a produção de ladrilho hidráulico**. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Construções Rurais e Ambientação) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB. 2021.

RESUMO: O acúmulo dos resíduos gerados, em conjunto com sua deposição irregular no meio em que vivemos, apresenta-se como alguns dos maiores problemas da sociedade atual. Durante o beneficiamento da vermiculita, resíduos são gerados e acumulados de forma aleatória no meio ambiente, causando impactos à região circundante. Diante disso, objetivou-se com esta pesquisa, desenvolver argamassa com substituição parcial da areia artificial por resíduo de vermiculita para a produção de um protótipo de ladrilho hidráulico para piso. Com a aquisição do resíduo de vermiculita, o mesmo passou por processo de caracterizações, avaliando sua viabilidade para compor a argamassa. Posteriormente, houve a elaboração das argamassas com traço 1:4 (cimento: areia artificial), utilizando o cimento Portland CP V-ARI, com substituição da areia artificial por resíduo de vermiculita em 0%, 10%, 30% e 50% e com um fator água/cimento entre 0,9 e 1,18. Com a preparação, as argamassas foram avaliadas em seu estado endurecido aos 7, 14 e 21 dias, por meio dos ensaios de resistência à compressão, absorção por capilaridade e absorção por imersão. Com o melhor resultado, foi formulado o protótipo do ladrilho hidráulico (usando-se moldes comercialmente encontrados), tendo sido analisado visualmente, verificando uniformidade do acabamento superficial (face interna e externa) e a qualidade da moldagem, bem como a conformidade dimensional com o molde utilizado. A caracterização do resíduo de vermiculita mostrou um índice elevado de finos, o que levou ao preenchimento de vazios existentes na argamassa, viabilizando a aplicabilidade da argamassa contendo 10% de resíduo de vermiculita, possuindo uma absorção geral (capilar e imersão) que não afeta significativamente a sua capacidade mecânica de resistir a cargas, sendo esta última característica, maior dentre as demais argamassas. Tendo em vista tal comportamento, a mesma foi aplicada na produção do protótipo do ladrilho, resultando em peças que apresentaram-se em conformidade com seus moldes, acabamento superficial satisfatório e sem variações dimensionais indesejáveis, constatando efetividade de viabilidade técnica do emprego do resíduo de vermiculita neste tipo de material de construção.

Palavras-chave: Sustentabilidade; Materiais alternativos; Rejeitos; Pisos; Mineral.

BRITO, Alícia Nayana dos Santos Lima de. **Aproveitamento de resíduo de vermiculita em argamassa alternativa para a produção de ladrilho hidráulico**. 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola – Construções Rurais e Ambiência) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB. 2021.

ABSTRACT: The accumulation of waste generated, together with its irregular deposition in the environment in which we live, presents itself as some of the biggest problems of today's society. During the processing of vermiculite, residues are generated and accumulated randomly in the environment, causing impacts to the surrounding region. Therefore, the objective of this research was to develop mortar with partial replacement of artificial sand by vermiculite residue for the production of a prototype of hydraulic floor tile. With the acquisition of vermiculite residue, it went through a characterization process, evaluating its feasibility to compose the mortar. Subsequently, mortars with a 1:4 mix (cement: artificial sand) were prepared, using Portland cement CP V-ARI, replacing the artificial sand with vermiculite residue at 0%, 10%, 30% and 50% and with a water/cement factor between 0.9 and 1.18. With the preparation, the mortars were evaluated in their hardened state at 7, 14 and 21 days, by means of compressive strength, capillary absorption and immersion absorption tests. With the best result, the prototype of the hydraulic tile was formulated (using commercially available molds), having been visually analyzed, verifying uniformity of the surface finish (internal and external face) and the quality of the molding, as well as the dimensional conformity with the used mold. The characterization of the vermiculite residue showed a high level of fines, which led to the filling of existing voids in the mortar, enabling the applicability of the mortar containing 10% of vermiculite residue, having a general absorption (capillary and immersion) that does not significantly affect its mechanical capacity to resist loads, being this last characteristic, greater among the other mortars. In view of this behavior, the same was applied in the production of the tile prototype, resulting in pieces that were presented in accordance with their molds, satisfactory surface finish and without undesirable dimensional variations, noting the effectiveness of the technical feasibility of the use of vermiculite residue in this type of building material.

Keywords: Sustainability; Alternative materials; Tailings; Floors; Mineral.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01. Areia artificia (Pó de pedra).....	20
Figura 02. Resíduo de vermiculita	23
Figura 03. Exemplos de ladrilhos hidráulicos: a) ladrilhos com textura e colorido; b) ladrilho com mapa de São Paulo	36
Figura 04. Exemplos de ladrilhos hidráulicos com texturas diversificadas e função antiderrapante	37
Figura 05. Sequência da fabricação do ladrilho hidráulico prensado	38
Figura 06. Exemplos de moldes com texturas e dimensões disponíveis comercialmente	38
Figura 07. Esquematização das etapas	41
Figura 08. Cimento Portland V – ARI e Areia artificial (pó de pedra)	42
Figura 09. Resíduo de Vermiculita	42
Figura 10. Ensaio de granulometria	43
Figura 11. Distribuição da areia artificial retida no conjunto de peneiras	44
Figura 12. Ensaio de massa unitária da areia artificial	45
Figura 13. Corpos de prova	47
Figura 14. Cura dos corpos de prova	48
Figura 15. Medição por meio de paquímetro digital	49
Figura 16. Prensa CONTENCO	50
Figura 17. Esquematização da obtenção da tensão suportada em MPa	50
Figura 18. Corpos de prova submetidos à secagem em estufa.....	52

Figura 19. Corpos de prova submetidos à imersão por 72h	53
Figura 20. Corpos de prova com uma das faces em contato com a água por 72h.....	54
Figura 21. Molde utilizado para formulação do protótipo (32cm x 32cm x 2,5cm).....	55
Figura 22. Consistência da argamassa	64
Figura 23. Formas de ruptura do corpo de prova.....	67
Figura 24. Resistência à compressão (MPa) aos 7, 14 e 21 dias.....	68
Figura 25. Ensaio de absorção por imersão.....	72
Figura 26. Efeitos da quantidade de resíduo sobre a absorção por capilaridade.....	75
Figura 27. Efeitos do tempo de cura sobre a absorção por capilaridade.....	77
Figura 28. Presença de bolhas de ar na placa.....	79
Figura 29. Aparência final da placa	79
Figura 30. Face externa e lateral do ladrilho.....	80

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Classificação da argamassa fresca de acordo com sua massa específica....	27
Tabela 02. Quantificação geral do material utilizado para a formulação das argamassas no traço 1:4 e seu respectivo fator água/aglomerante.....	47
Tabela 03. Porcentagem com seus respectivos ensaios e tempos de cura, de acordo com a quantidade de corpos de prova formulados.....	48
Tabela 04. Coeficiente d_2	51
Tabela 05. Avaliação do ensaio por meio do CV_e encontrado.....	52
Tabela 06. Caracterização granulométrica da areia artificial.....	57
Tabela 07. Faixa de classificação para o agregado miúdo.....	58
Tabela 08. Caracterização granulométrica do resíduo de vermiculita.....	59
Tabela 09. Caracterização granulométrica dos agregados miúdos.....	59
Tabela 10. Massa unitária dos agregados.....	61
Tabela 11. Massa específica e capacidade de absorção da areia artificial e do resíduo de vermiculita	63
Tabela 12. Média do peso (g) dos corpos de prova em relação ao aumento de incorporação do resíduo de vermiculita.....	65
Tabela 13. Análise de variância do efeito dos tratamentos e tempo de cura sobre a resistência à compressão uniaxial.....	67
Tabela 14. Eficiência do ensaio de resistência à compressão.....	71
Tabela 15. Análise de variância do efeito dos tratamentos e tempo de cura sobre a absorção por capilaridade.....	75

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1 Objetivo Geral	17
2.2 Objetivos Específicos	17
3. REVISÃO DE LITERATURA	18
3.1 Exploração mineral x Desenvolvimento Sustentável	18
3.2 Geração de resíduos.....	19
3.3 Areia artificial (Pó de Pedra).....	20
3.4 Vermiculita	21
3.4.1 Resíduo de vermiculita	22
3.5 Argamassas	24
3.5.1 Composição e aplicabilidade	24
3.5.2 Principais propriedades da argamassa no estado fresco	25
3.5.2.1 Consistência, Plasticidade e Trabalhabilidade	26
3.5.2.2 Massa específica e Teor de ar incorporado	26
3.5.2.3 Retenção de água	27
3.5.2.4 Adesão inicial	28
3.5.3 Principais propriedades da argamassa no estado endurecido	29
3.5.3.1 Resistência mecânica.....	29
3.5.3.2 Aderência ao substrato.....	30
3.5.3.3 Permeabilidade e Durabilidade.....	30
3.5.3.4 Retração	31
3.5.3.5 Capacidade de absorver deformações.....	32
3.6 Argamassas com incorporações residuais	33
3.7 Ladrilho hidráulico (placa para piso de passeio).....	36

4. MATERIAL E MÉTODOS	40
4.1 Aquisição do material	41
4.2 Caracterização dos materiais	43
4.2.1 Granulometria	43
4.2.2 Massa específica	44
4.2.3 Massa unitária	45
4.2.4 Absorção de água	46
4.3 Produção das argamassas	46
4.4 Produção dos corpos de prova	47
4.5 Caracterização das argamassas em estado endurecido	49
4.5.1 Resistência à compressão	49
4.5.2 Absorção de água por imersão	52
4.5.3 Absorção por capilaridade	53
4.6 Produção do protótipo de ladrilho hidráulico	54
4.7 Delineamento Estatístico	56
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
5.1 Caracterização dos materiais	57
5.1.1 Granulometria dos agregados	57
5.1.1.1 Análise geral dos resultados granulométricos	60
5.1.2 Massa unitária dos agregados	61
5.1.3 Massa específica e absorção dos agregados	62
5.2 Produção das argamassas	63
5.2.1 Influência do resíduo de vermiculita nos corpos de prova	64
5.3 Avaliação das argamassas no estado endurecido	66
5.3.1 Resistência à Compressão	66
5.3.2 Absorção por imersão	71
5.3.3 Absorção por capilaridade	74

5.4 Protótipo do Ladrilho hidráulico	79
6. CONCLUSÃO	81
6.1 Sugestões para trabalhos futuros	82
7. REFERÊNCIAS	83

1. INTRODUÇÃO

O Brasil se apresenta como um país de alta relevância na produção de resíduos gerados pelo beneficiamento de todo e qualquer material bruto a ser aproveitado. Muitos desses resíduos são descartados de forma indevida na natureza, acarretando danos às paisagens, contaminando o solo, podendo comprometer até a fauna e flora local. Um exemplo é o resíduo gerado do beneficiamento da vermiculita que, por ser formado por partículas micro finas, ainda não possui destino comercial definido, sendo assim, descartados, mesmo contendo quantidades significativas do minério em sua composição, apresentando características que podem possibilitar eficácia física e mecânica em materiais a serem incorporados, devido a suas propriedades ainda existentes.

Uma forma de aproveitamento desses resíduos é a de utilizá-los na composição de novos materiais de construção, aliando o uso de um material sem valor econômico para a indústria, minorando o problema do volume desse rejeito que é disposto na natureza, auxiliando no planejamento ambiental das cidades, além de reduzir o índice exploratório da crescente demanda de areia natural no mercado nacional e a exaustão dessas reservas, contribuindo com êxito para o equilíbrio do meio ambiente.

Os resíduos minerais podem ser aproveitados em diversos produtos da construção civil, como na elaboração de argamassas e concretos. Seu aproveitamento depende, especificamente, de suas propriedades físicas e mineralógicas que determinam as situações mais viáveis à aplicação. Variadas pesquisas têm buscado objetivar o desenvolvimento de técnicas de fabricação e substituição parcial de agregados miúdos em argamassas, por meio da adição desses resíduos, a fim de gerar novos materiais sustentáveis, buscando a viabilidade de proporcionar a mesma finalidade e, até mesmo, características adicionais aos materiais convencionais na construção civil.

Ao fazer a utilização do resíduo de vermiculita em argamassa, Dias (2018) obteve uma eficácia quanto à resistência à compressão da argamassa, contendo cerca de 60% de substituição da areia pelo resíduo, quando comparada à argamassa de referência (sem resíduo), resultando em melhoria nas propriedades mecânicas.

A variação da granulometria do resíduo de vermiculita, associada ao agregado miúdo utilizado, favorece um melhor empacotamento dos grãos, reduzindo o volume de vazios e, conseqüentemente, elevando sua capacidade de resistência.

Diante de disso, surge nesse estudo, a possibilidade do uso do resíduo de vermiculita, juntamente com a areia artificial (pó de pedra – diâmetro máximo de 4,8mm, sendo classificado como areia média; possui baixo valor comercial, pois, anteriormente, não possuía utilidade), como uma opção de formulação de argamassa que venha a produzir ladrilhos hidráulicos para compor revestimentos de pisos, podendo assim, serem implementados em áreas externas de edificações rurais, como garagens, pátios ou no interior de galpões, como os de armazenamento de produtos e implementos agrícolas, além de se considerar como uma opção de aproveitamento desse material residual que, nas variadas regiões de exploração e beneficiamento de vermiculita, estocam-se elevadas quantidades, sem destinação.

O uso de materiais alternativos possui tanto propósitos de empregabilidade dos resíduos descartados, como também colabora, promovendo novos conceitos de qualidade, buscando uma nova fonte de matérias-primas a serem utilizadas na fabricação de novos materiais.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Desenvolver argamassa com substituição parcial da areia artificial por resíduo de vermiculita para a produção de um protótipo de ladrilho hidráulico para piso.

2.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar fisicamente os agregados (areia artificial e resíduo de vermiculita) quanto à composição granulométrica, massa unitária, massa específica e absorção de água, a fim de identificar e conhecer suas propriedades físicas;
- Avaliar como diferentes proporções da incorporação do resíduo de vermiculita influencia nas propriedades mecânicas da argamassa de cimento Portland no estado endurecido;
- Produzir um protótipo de ladrilho hidráulico para piso com a melhor proporção de substituição para apresentação e verificação visual, certificando se a qualidade da superfície aparente foi alcançada uniformemente.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Exploração mineral x Desenvolvimento Sustentável

Em termos de riqueza abrangente de recursos naturais existentes, o Brasil se destaca mundialmente falando, principalmente no que se diz respeito à elevada variedade de minérios presentes. A exploração mineral contribui diretamente para a economia do país, visto que tais minérios servem de matérias-primas para diversos tipos de produtos que são fabricados, dos mais simples até os que se apresentam com um grau maior de complexidade tecnológica.

Com o crescimento contínuo da população, a demanda por essas matérias-primas tem aumentado significativamente, tanto pelo desenvolvimento industrial, como pela construção civil, com a exploração da areia natural, cascalhos, brita, dentre outros, a fim de suprir as necessidades da população. Por mais vantajoso que seja todo o retorno econômico para o país, é impossível não pensar em quão degradante essa exploração pode ser ao meio ambiente.

Evidencia-se que a mineração seja realizada, observando o princípio racional dos recursos naturais, seguindo os objetivos da Política Nacional do Meio Ambiente (PNMA), para que se mantenha em equilíbrio o meio, fazendo-se uso admissível do solo, da água e dos recursos naturais em geral (VIEIRA e REZENDE, 2015).

Referente à constante preocupação com a preservação do meio ambiente, visando meios de conscientização na construção civil, conciliado às grandes indústrias e mineradoras, diversas pesquisas vêm sendo executadas, com o intuito de incentivar a busca de alternativas para a substituição destes meios naturais, como por exemplo, na incorporação de certos rejeitos industriais em substituição aos agregados naturais, na confecção de argamassas e concretos (MENOSSI, 2004).

Concisamente, o desenvolvimento da atividade de mineração precisa ser analisado com base em uma visão global, associada a projetos que envolvam aspectos socioeconômicos e ambientais, almejando a concretização de uma exploração que seja menos degradante para o meio.

3.2 Geração de resíduos

Reconhecida por ser uma das bases econômicas do Brasil, a mineração é uma atividade considerada essencial para a sociedade, já que os minérios são encontrados em grande parte dos produtos que consumimos, porém, é considerada uma das principais causadoras de impactos ambientais, devido ao aumento do consumo dos recursos naturais e geração de resíduos para o meio ambiente (GUERRA, 2014).

Os resíduos gerados são provenientes do processo de extração e beneficiamento do minério explorado, são exemplos os resíduos sólidos (minérios pobres, rochas, sedimentos de cursos d'água e solos), as lamas das serrarias de mármore e granito, os resíduos/rejeitos da mineração artesanal de pedras preciosas e semipreciosas, rejeitos finos e ultrafinos não aproveitados no beneficiamento. Os resíduos estão divididos em dois principais grupos: os estéreis e os rejeitos. Os estéreis são provenientes das atividades de lavra, não possuem valor econômico e são dispostos em pilhas; já os rejeitos são resultantes do beneficiamento do minério. Ambos os processos padronizam tamanhos e removem minerais sem valor econômico, garantindo pureza e qualidade do artigo final (SILVA, VIANA e CAVALCANTI, 2012).

Tendo isso em vista tal realidade, faz-se necessário que mineradoras possam ter, em seu projeto de exploração, meios que possam viabilizar a deposição ambiental correta e segura e, até mesmo, a possibilidade de uso desses fragmentos residuais gerados.

Geralmente, usa-se a deposição em forma de estrutura projetada e implantada para acumular materiais, em caráter temporário ou definitivo (resíduos estéreis), como também o uso de barragens de rejeitos, as quais são projetadas como uma estrutura de engenharia para contenção e deposição de resíduos originados de beneficiamento de minérios, captação de água e tratamento de efluentes, porém, nos dias atuais, tem-se intensificado pesquisas referentes à utilização desse material residual como novas fontes de matérias-primas em diversos tipos de setores, entre eles, a construção civil, formulando novos materiais construtivos, diversificando a oferta de materiais alternativos considerados sustentáveis, visando a redução de custos, assim como aplacar, ao máximo, a disposição dos resíduos no meio ambiente (NASCIMENTO, 2008; SILVA, VIANA e CAVALCANTI, 2012; GUERRA, 2014).

A forma mais eficiente para tentar amenizar o acúmulo de resíduo gerado, e que pode ser utilizada para a indústria da construção se tornar uma atividade sustentável, passa pela incorporação de resíduos de outras indústrias em materiais de construção (CAMPOS, 2015).

O uso de resíduos na composição de argamassas pode ser uma solução viável, econômica e tecnicamente. Pesquisas com variados tipos de resíduos são encontradas na implementação dessas misturas, desenvolvendo-se e determinando suas possibilidades que, predominantemente, são baseadas em estudos laboratoriais, comprovando a viabilidade dessas alternativas. Com a crescente exploração da areia natural, toma-se como escolha o uso desses tipos de materiais, tal qual o pó de pedra, que é considerado uma opção para a substituição da areia natural, por ter um custo menor, pois o seu processo de produção é proveniente da britagem de rochas (RIBEIRO et al., 2016). Sendo assim, uma solução viável para questões ambientais e com resultados aceitáveis.

3.3 Areia artificial (Pó de pedra)

O uso da areia artificial ou comumente conhecido como pó de pedra (Figura 01) como agregado miúdo tem sido amplamente estudada, tanto pela análise mecânica do produto a ser formulado, quanto pelo aspecto sustentável e econômico (MENOSSI, 2004).

Figura 01: Areia artificial (Pó de pedra)



As rochas, ao serem fragmentadas no processo de britagem, para a produção de agregados, resultam em cinco produtos, possuindo destino comercial, os quatro primeiros, sendo o último apenas acumulado: Brita 3: Aplicação em lastro ferroviário; Brita 2: Agregado em grandes volumes de concreto e brita de base e sub-base de pavimento; Brita 1: Agregado de concreto esbelto e bombeado; Brita 0 (12,5 a 4,75 mm - para calçamentos com base asfáltica e de concreto para obtenção de textura fina, fabricação de pré-moldados, na confecção de argamassa para assentamento e emboço) e Pó de pedra (0,075 mm): Finos estocados em pilhas nas áreas das pedreiras (ALMEIDA e SILVA, 2005, apud CAMPOS, 2015).

Apesar de ser considerado um subproduto e, até mesmo denominado de resíduo, o pó de pedra, ainda assim, é aproveitado, mesmo que em pequena escala, seja em pavimentação nas camadas de base e sub-base em conjunto com a brita 0 (CAMPOS, 2015) ou, até mesmo, como substituto total ou parcial do agregado miúdo. Da maneira que for aproveitada, desde que se tenha um estudo prévio para a correta destinação, o seu uso tem se tornado uma alternativa sustentável.

3.4 Vermiculita

O Brasil é detentor de 14% das reservas mundiais de vermiculita. As principais reservas são encontradas no estado de Goiás, com mais de 70%, e o restante distribuído entre a Paraíba, Bahia, Piauí e Pernambuco. Em 2017, os estados de Goiás (90,7%), Paraíba (4,9%) e Pernambuco (4,4%) foram responsáveis pela produção de 57 mil toneladas de vermiculita beneficiada. O processo de extração da substância no país é executado a céu aberto, parcial ou totalmente mecanizado, observando-se uma periodicidade de maior produção, durante os meses secos (PAULA, 2018).

A vermiculita é um argilomineral existente na natureza, na forma de macro e microcristais, tratando-se de um silicato hidratado de formato lamelar, contendo quantidades variáveis de ferro, magnésio, potássio e alumina. Suas características físicas são as mesmas das micas, no que se refere à clivagem típica, separando-se em finas lamelas flexíveis, porém sem elasticidade, possuindo diversas propriedades físicas e químicas que a tornam de amplo uso na indústria e agricultura (UGARTE, SAMPAIO e FRANÇA, 2008; FERREIRA, 2009; PAULA, 2018).

Segundo França et al. (2016), a composição química geral da vermiculita em relação aos óxidos, é 14,4% de MgO, 43,5% de Al₂O₃, 12,8% de FeO, 11,9% de SiO₂, 17,9% de H₂O. Quando realizados processos para a retirada de impurezas, resulta em um produto leve, incombustível, insolúvel em água e em todos os solventes orgânicos.

A vermiculita possui um enorme potencial para aplicações industriais e ambientais, podendo ser empregada como isolante térmico e acústico, material de proteção para produtos frágeis, flocos para retenção de água aplicados na agricultura, como corretivo e condicionador de solos, como agente para remoção de óleos e contaminantes orgânicos, em casos de derramamentos (PURCENO, 2010, apud NUNES, 2015).

A procura mais comum da vermiculita na construção civil é quando ela se encontra expandida, ou seja, quando ela passa por um aquecimento a temperaturas extremamente elevadas, fazendo com que a água contida em suas partículas evapore, expandindo-as, originando um material quimicamente ativo, poroso, leve e de baixa condutividade térmica. Teoricamente, a vermiculita beneficiada pura expande até 30 ou 40 vezes o seu volume original. Já a vermiculita que é vendida naturalmente expande em média de 8 a 12 vezes, é possível que essa diferença aconteça por fatores ligados à presença de impurezas e características físico-químicas (NASCIMENTO, 2008).

Segundo Nascimento (2008), o concreto vermiculítico consegue compatibilizar o baixo peso com uma boa resistência mecânica, quando utilizado em áreas que não exijam grandes esforços.

A vermiculita possui características naturais de baixa condutividade térmica, além de possuir a capacidade de isolamento acústico, podendo auxiliar na redução de ruídos entre os pavimentos.

3.4.1 Resíduo de vermiculita

Os processos de beneficiamento aos quais a vermiculita é submetida são baseados em propriedades como forma, composição, resistência à fragmentação, entre outros.

O valor de um minério de vermiculita depende da distribuição e da eficiência do aproveitamento das partículas maiores do mineral (UGARTE, SAMPAIO e FRANÇA, 2008), portanto, o resíduo de vermiculita (Figura 02), ou seja, o material resultante do beneficiamento do minério com teores mínimos de vermiculita não apresenta valor econômico para as empresas, pelo fato de não possuir uma aplicação em escala considerável, sendo assim, descartado, mesmo tendo em sua composição, valores significativos de minerais.

Figura 02: Resíduo de Vermiculita



Fonte: Dias, 2018

De acordo com Rojas-Ramirez et al. (2019), normalmente, quando a mineração da vermiculita ocorre a céu aberto, o minério é britado e passa por uma espécie de grelha para retenção do material mais grosso. O material passado é seco, peneirado e separado em três dimensões granulométricas: grossa, média e fina. O material que não se enquadra nessas frações é mandado a um moinho para a realização de uma nova fragmentação e retorna para as peneiras. O produto mais fino passa por um aéro classificador, sendo coletado, e o que resta é descartado no processo: essa fração é um resíduo fino que ainda não possui aplicação em larga escala, sendo assim, rejeitado.

Em uma pesquisa intitulada como “Diagnóstico espaço-temporal das áreas impactadas pela MPL - Mineração Pedra Lavrada (Santa Luzia-PB), na extração de vermiculita” foi constatado uma grande concentração de rejeito gerado pela MPL, chegando a produzir cerca de 10 toneladas de minérios diariamente com, aproximadamente, 3% de rejeição para o material ultrafino que não tem importância econômica e que é descartado de forma indevida, podendo vir a gerar consequências ao

meio, tais como, degradação da vegetação local e irregularidades no relevo (ALENCAR et al., 2015).

Segundo Sousa (2012) a lavra do minério de vermiculita em Santa Luzia - PB é feita a céu aberto, com a separação dos fragmentos de forma mecânica (tendo a fração fina menor que 0,5 mm descartada da etapa), utilizando trator de esteira para escarificação do minério, que é levado por caminhões basculantes até a usina de beneficiamento.

3.5 Argamassas

3.5.1 Composição e aplicabilidade

A argamassa consiste em um material de construção composto por uma mistura homogênea de um ou mais aglomerantes, agregado miúdo e seu meio de reação, podendo adicionar aditivos que melhorem determinadas propriedades da mesma.

As argamassas são comumente utilizadas para assentamento de blocos cerâmicos, pedras e tijolos, no sistema de levantamento de alvenaria ou vedação (encunhamento), bem como é utilizada em revestimento de paredes e tetos, onde existem várias camadas a serem executadas (CARASEK, 2010).

É necessário que a argamassa apresente algumas propriedades para que a mesma possa exercer suas funções. O aglomerante, elemento ativo que compõe a mistura, devido a sua formação, é responsável em grande parte pelo cumprimento dessas propriedades, sejam elas apresentadas no estado fresco ou endurecido, cabendo ao agregado, a função de redução de instabilidade dimensional da mistura, otimizando a durabilidade e resistência mecânica da argamassa, além de baratear o custo final devido ao volume empregado.

Evidencia-se que para que uma argamassa seja de boa qualidade, é preciso que os grãos do agregado estejam completamente envolvidos pela pasta (aglomerante + água). Em conjunto, esses materiais tendem a um melhor empacotamento das partículas devido ao preenchimento dos vazios, havendo uma complementação. A argamassa, quando não apresenta um bom empacotamento, pode apresentar um número de vazios elevados, aumentando a permeabilidade e reduzindo a sua resistência.

Considerando a exposição e funções que a argamassa irá desempenhar após sua aplicação (CUNHA et al., 2018), há uma variação no percentual de cada um dos materiais empregados, podendo haver argamassas mistas (mais de um aglomerante) e argamassas com diversos tipos de agregados (CANEDO, BRANDÃO, PEIXOTO FILHO, 2011). As argamassas ainda são diferenciadas quanto ao tipo de aglomerante (aéreo – reage com o CO₂; hidráulico – reage com água; e mistos – uso do aéreo e hidráulico), quanto à dosagem (pobre – preenchimento insuficiente dos vazios do agregado; cheia – vazios completamente preenchidos pela pasta; rica – quando há excesso da pasta), quanto à consistência (seca – pouca água; plástica – quantidade de água é suficiente para promover boa trabalhabilidade; e fluida – excesso de água).

Além das diferentes formas citadas acima de como a argamassa é classificada, há ainda, a classificação quanto ao emprego, podendo ser refratárias (resistem à elevadas temperaturas) e as comuns (usualmente utilizadas no cotidiano).

Para construção de alvenarias, tem-se argamassa de assentamento e de fixação, apresentando propriedades de aderência e endurecimento; para revestimento de paredes e tetos, as argamassas são denominadas como chapisco, emboço, reboco, camada única e revestimento monocamada decorativo; para revestimento de pisos, elas são do tipo argamassa de contrapiso e de alta resistência para piso; para revestimentos cerâmicos, tem-se argamassa de assentamento de peças cerâmicas (colante) e de rejuntamento; e, para reforço e recuperação de estruturas, ela é definida como argamassa de reparo (AGUIAR, 2017).

3.5.2 Principais propriedades da argamassa no estado fresco

Para que uma argamassa seja considerada de boa qualidade, ela deve ser confeccionada seguindo algumas propriedades. Em relação ao estado fresco da argamassa, destacam-se a consistência, a plasticidade, a trabalhabilidade, o teor de ar incorporado, a retenção de água, a massa específica e a adesão inicial (PCZIECZEK, 2017), detalhados a seguir.

3.5.2.1 Consistência, Plasticidade e Trabalhabilidade

Algumas propriedades se encontram interligadas pelos fatores que as influem. Influenciadas diretamente pela quantidade de água inserida na mistura, bem como pela relação aglomerante/agregado, por consistência, plasticidade e trabalhabilidade compreenda-se como a capacidade de mobilidade da argamassa em uma condição homogênea.

Foi constatado por Carasek et al. (2016), em sua pesquisa que, quanto maior a porosidade da areia (menor empacotamento dos grãos), menor o índice de consistência (fluidez reduzida), independente de outras características dos agregados, como a forma e a textura. Ainda reforçam que a massa unitária da areia é o parâmetro que melhor explica a consistência da argamassa, fatores que vão desde a forma do grão até a quantidade de finos no material são interligados diretamente com a quantidade de poros presentes na mistura.

A capacidade de manuseio da argamassa, sem que haja segregação dos elementos, tende a ser influenciada pelos tipos e pelas quantidades de aglomerantes e agregados, pelo tempo e intensidade de mistura, bem como o teor de ar incorporado (CANEDO, BRANDÃO, PEIXOTO FILHO, 2011).

Ao alcançar tal característica, a argamassa se apresenta amplamente coesa, conseguindo a mistura dos elementos sem grandes esforços, fazendo com que a mesma se encontre apta, salientando assim, consistência, plasticidade e trabalhabilidade adequadas à utilização, ajustando-as de acordo com a forma de aplicação.

3.5.2.2 Massa específica e Teor de ar incorporado

Na mesma relação de interligação das propriedades, a massa específica dos constituintes da argamassa varia, promovendo também, variação na quantidade de ar incorporado à mesma.

Carasek (2010) enfatiza que, quanto mais leve a argamassa, mais trabalhável a longo prazo ela será, diminuindo o esforço operário em sua aplicação. A Tabela 01 apresenta uma classificação de acordo com a massa específica da argamassa, em concordância com o determinado pela NBR NM 13278 (ABNT, 2005), bem como pelo teor de ar incorporado, que também pode ser encontrado pela mesma norma, pelo

método gravimétrico ou através de normatização internacional específicas para argamassas.

Tabela 01: Classificação da argamassa fresca de acordo com sua massa específica

Argamassa	Massa Específica $\rho = (\text{g/cm}^3)$	Principais agregados empregados	Usos/observações
Leve	$<1,40$	Vermiculita, perlita, argila expandida	Isolamento térmico e acústico
Normal	$2,30 \leq \rho \leq 1,40$	Areia de rio (quartzo) e calcário britado	Aplicações convencionais
Pesada	$>2,30$	Brita (sulfato de bário)	Blindagem da radiação

Fonte: Carasek, 2010

A quantidade de ar presente na argamassa está relacionada com a trabalhabilidade da argamassa. Canedo, Brandão e Peixoto Filho (2011) afirmam que o uso de aditivos incorporadores de ar proporciona, à argamassa, maior trabalhabilidade, por meio do seu efeito plastificante, além da sua capacidade de redução do atrito entre as partículas constituintes da argamassa, fazendo com que se tenha uma diminuição da quantidade de água, propiciando tal melhoria.

3.5.2.3 Retenção de água

Essa propriedade trata da capacidade de a argamassa conseguir manter sua maleabilidade, quando a mesma possa vir a sofrer, com ações que reduzam a quantidade de água presente em seu estado fresco. Carasek (2010) especifica que tal propriedade também influencia a argamassa, em seu estado endurecido, visto que as mesmas dependem de uma adequada retenção de água, para que as reações químicas de endurecimento do aglomerante ocorram apropriadamente.

As argamassas, ao serem formuladas, devem possuir valores adequados de retenção de água, para que não afete seu desempenho na aplicação. Schankoski, Prudêncio Jr. e Pilar (2015) declaram que as normas brasileiras que abordam retenção de água e que estão em vigor atualmente não prescrevem limites para essa propriedade.

Porém, enfatiza-se que uma baixa retenção pode provocar perda de trabalhabilidade, prejudicando a aderência na hora da aplicação no substrato, pois terá a

sua plasticidade também diminuída (TOKARSKI et al., 2018). Em pesquisa conduzida pelos mesmos autores citados, constatou-se uma menor retenção de água em uma das misturas que continha maior quantidade de areia de britagem de rocha calcária, ao substituir a areia natural, visto que as argamassas de calcário reduzem a relação água/cimento, mostrando uma diminuição nos valores, em relação à argamassa de referência usada na pesquisa, fazendo-se necessário o uso de plastificante, a fim de manter sua consistência, na hora de empregá-la.

Já quando se encontra em um nível de alta retenção, a quantidade de água necessária para a ocorrência da hidratação dos elementos cimentícios pode rapidamente reduzir, seja por evaporação acelerada em locais que apresentem temperatura alta, seja por absorção da base que está recebendo a argamassa, impedindo a correta reação química. Porém, há controvérsias. Breitenbach et al. (2017) afirmam, em sua pesquisa com argamassas à base de cal, que a elevada retenção de água permite evitar, não só a sucção rápida da água por parte do suporte, como também a perda em excesso de água de amassadura durante o processo de endurecimento; ainda observaram que a quantidade de água retida aumentou com o teor de resíduo do polimento de porcelanato empregado, apresentando-se juntamente com a cal, um resultado de excelente capacidade de retenção de água, o que pode não permitir a absorção excessiva de água pela alvenaria.

3.5.2.4 Adesão inicial

Encontra-se diretamente relacionada à reologia da pasta, particularmente à tensão superficial, tendo como finalidade a capacidade de a argamassa, em seu estado fresco, unir-se à base na qual será aplicada.

Segundo Carasek (2010), a redução da tensão superficial da pasta promove um maior contato da pasta com os grãos de agregado e também com a base, aprimorando a adesão. Um exemplo de material que proporciona tal característica é a incorporação da cal na argamassa que contribui significativamente para a diminuição da tensão superficial.

3.5.3 Principais propriedades da argamassa no estado endurecido

Como já visto anteriormente, a argamassa apresenta características especiais, de acordo com sua utilização. A particularidade de cada propriedade no estado fresco influi diretamente no desempenho da argamassa que, por sua vez, reflete nas propriedades do estado endurecido. Além da necessidade da formulação correta da argamassa, a mesma será submetida a diversos agentes de exposição (temperatura, abrasão, umidade, etc.) que podem comprometer sua vida útil. Diante disso, ressalta-se a necessidade de verificar a resistência mecânica, a aderência ao substrato, durabilidade e permeabilidade, retração e capacidade de absorver deformações.

3.5.3.1 Resistência mecânica

Essa propriedade pode variar de acordo com as solicitações de cargas, geralmente por tensões simultâneas de compressão, tração e cisalhamento (SELMO, 1989, apud DALLAGNOL, 2018) às quais a argamassa é submetida, representando sua capacidade de suportar, de forma satisfatória, tais esforços mecânicos. De acordo com Recena (2012) a resistência mecânica das argamassas é um elemento relevante no que corresponde à qualidade, tendo em vista a verificação da homogeneidade das operações de produção.

Variados são os fatores que influem na resistência mecânica da argamassa, dentre os quais, pode-se destacar: o fator água/aglomerante, forma e granulometria dos agregados, o tipo de cimento empregado, entre outros. Além disso, Dallagnol (2018) afirma que a resistência também sofre influência de acordo com a proporção dos materiais constituintes da argamassa, e essa característica normalmente melhora, empregando um maior consumo de cimento na mistura.

Em sua pesquisa, Carasek et al. (2018) observaram que as argamassas constituídas com agregados mais grossos demandaram menos água (menor relação água/ materiais secos), resultando em uma menor porosidade da pasta, porém, essa resistência reduziu quando se utilizou agregados reciclados de mesma dimensão máxima da areia natural usada.

Em contrapartida, na mesma linha de uso de agregado alternativo, em substituição ao agregado natural, foi encontrado por Dias et al. (2018) uma maior

resistência à compressão aos 28 dias em argamassa com 60% de resíduo de vermiculita, fato esse explicado devido ao teor de finos presentes, havendo melhora na coesão entre agregado e pasta.

3.5.3.2 Aderência ao substrato

Refere-se à capacidade de resistir a esforços submetidos, fazendo com que não haja deslocamento da argamassa, da base onde foi aplicada. Todo processo de ligação da argamassa ao substrato/base ocorre mecanicamente, através do endurecimento do aglomerante que penetra nos poros da base, junto com a água de amassamento.

A aderência está diretamente ligada à argamassa e ao tipo de material em que está havendo a aplicação, pelo fato de que tal aderência é uma propriedade que depende da interação dos dois materiais, logo, quanto melhor for o contato entre a argamassa e o substrato, maior será a aderência obtida (CARASEK, 2010). Com isso, enfatiza-se uma correlação da trabalhabilidade da argamassa no estado fresco, juntamente com as características da base, associadas também a fatores externos (mão de obra, execução, condições climáticas), aspectos decisivos no desempenho da aderência.

O baixo valor de resistência de aderência pode causar manifestações patológicas nas argamassas, por exemplo, descolamentos e fissuras, trazendo, além de desconforto na habitabilidade, prejuízos econômicos (CANEDO, BRANDÃO e PEIXOTO FILHO, 2011).

Em pesquisa realizada por Breitenbach et al. (2017), ao adicionar resíduo de polimento de porcelanato em argamassas à base de cal, observou-se um aumento na resistência de aderência à tração, em relação à de referência, revelando a capacidade de resistir à deformações por tração e por cisalhamento, sem danos.

3.5.3.3 Permeabilidade e Durabilidade

A permeabilidade está relacionada com a passagem de água, por meio da argamassa endurecida, tanto no estado líquido quanto no de vapor, sendo este último recomendável por favorecer a secagem da superfície e impedir a condensação de água no local. O índice de permeabilidade é um dos fatores que influenciam em outra

propriedade da argamassa, a durabilidade, que consta na capacidade de manter suas qualidades por um longo tempo, sem qualquer deterioração relevante.

Além da permeabilidade, a durabilidade também depende das suas condições de exposição, que incluem ataque químico e agressão física (SOARES, 2014), bem como presença de sais solúveis encontrados na atmosfera, nos próprios materiais de construção ou fatores originados pela poluição atmosférica. Já a permeabilidade é influenciada, principalmente, pelas características dos materiais constituintes, técnica de execução, espessura da camada, natureza da base e por fissuras existentes.

A passagem da água se dá por meio dos poros capilares. Caso a argamassa esteja comprometida por meio de fissuração, a percolação de água é mais intensa, comprometendo a estanqueidade do sistema de vedação (CANEDO, BRANDÃO, PEIXOTO FILHO, 2011). Salienta-se a influência dos materiais finamente moídos em quantidade considerável, atuando no preenchimento dos poros das matrizes cimentícias, os quais tendem a modificar a estrutura, provocando a formação do efeito fíler e, conseqüentemente, colaborando para a redução da absorção (SOARES, 2014) e auxiliando no reforço da durabilidade.

Ao avaliar a durabilidade de argamassas de reparo, bem como seu índice de permeabilidade, Mendonza-Rangel et al. (2016) observaram que a argamassa contendo 20% de cinzas volantes em sua composição obteve menor permeabilidade (0,01 a 0,1) e apresentou boa resistência à exposição do ingresso de CO₂, quando comparada à argamassa de referência e às demais estudadas, dando relevância ao seu emprego em substituir argamassas industrializadas devido ao alto custo, valorizando o uso de argamassas tradicionais (cimento, areia com substituições minerais) para reparo eficaz e duradouro.

3.5.3.4 Retração

Ocorre quando há uma perda rápida da água da pasta, impedindo a correta hidratação do aglomerante, ocasionando fissuras.

A quantidade de material pulverulento, quando este se encontra em um índice considerável, tende a influenciar a retração, pelo fato de que sua presença na argamassa requer uma quantidade maior de água na hora do preparo, favorecendo a alta relação

água/aglomerante e, conseqüentemente, retraindo, ao perder a água em excesso. A retração se inicia desde o estado fresco da argamassa até seu endurecimento, podendo comprometer a durabilidade da mesma.

Quando a secagem é lenta, a argamassa consegue adquirir resistência à tração necessária para suportar as tensões que surgirem, porém, quando esse processo de secagem é acelerado, por meio da evaporação prematura, gera as fissuras de retração, bem como a influência direta da granulometria do agregado empregado, pois este determina o volume de vazios a ser preenchido pela pasta, logo, quanto maior esse volume, maior teor de pasta necessário, elevando-se, assim, o potencial de retração (CARASEK, 2010).

Breitenbach et al. (2017) observaram um aumento na retração linear, em todas as argamassas que possuíam polimento de porcelanato em sua composição, com mais destaque para as argamassas com teores de 20 a 30%, tendo como justificativa, o fato de possuir um elevado teor de finos presentes oriundos do resíduo, permitindo assim, a formação de poros com diâmetro menor e, conseqüentemente, maior retenção de água.

Resultados semelhantes foram encontrados por Carasek et al. (2018) ao observarem um aumento da retração em sua pesquisa, na inclusão de resíduo de construção, explicando que tal situação pode ter ocorrido pelo teor de material pulverulento do agregado, causando retração aos 28 dias e teor de finos totais das argamassas, causando retração aos 5 dias, resultando em uma argamassa com elevada relação água/materiais secos, contribuindo assim, para a retração plástica.

3.5.3.5 Capacidade de absorver deformações

É a capacidade de a argamassa ser capaz de absorver as deformações da base e dela própria, sem apresentar fissuras nem diminuir sua aderência. Tal característica está diretamente ligada aos modulo de elasticidade (deformação) da argamassa, espessura da camada, bem como técnicas de execução.

O módulo de elasticidade é constituído pela relação da tensão aplicada sobre o concreto ou argamassa e a sua capacidade de suportar as deformações, logo, quanto maior o valor do módulo de elasticidade, há um maior suporte de cargas, gerando uma menor deformação (PCZIECZEK, 2017).

A adequação do módulo de elasticidade e resistência à tração não significa a total inexistência de fissuras, pois há a ocorrência de microfissuras contendo um reduzido distanciamento entre as mesmas, fazendo com que não se propaguem, conseqüentemente, não sendo prejudiciais à estanqueidade e à durabilidade da argamassa (CINCOTTO et al., 1995, apud DALLAGNOL et al., 2018).

3.6 Argamassas com incorporações residuais

Diversas pesquisas acerca da aplicabilidade de variados tipos de resíduos na composição de argamassas (produto de ampla aplicabilidade no setor construtivo) vêm obtendo destaque, visando mitigar impactos ambientais causados pelo depósito mal planejado destes e pela exploração de agregados naturais, bem como contribuir para o desenvolvimento sustentável do setor, buscando métodos de formulação de materiais alternativos, evidenciando que as características mecânicas e físicas, no geral, variam para cada tipo de resíduo empregado.

Em relação ao grande consumo de areia natural na argamassa, alguns países a substituem por uma fração de areia artificial, ou agregado reciclado o que, por sua vez, diminui o descarte de resíduos sólidos no meio ambiente, sendo ecologicamente correto (SOARES e MÁRMORE, 2016).

Em estudo realizado por Marques e Campos (2012), abordando a substituição da areia natural pelo pó de pedra, analisando suas influências em argamassas de revestimento e assentamento, foi constatado que as argamassas produzidas com 100% de pó de pedra obtiveram melhores resultados referentes à resistência à compressão, porém, com um nível mais elevado de absorção, devido à necessidade de maior quantidade de água de amassamento, por causa dos finos do resíduo, quando comparado com a argamassa de referência.

Resultados semelhantes foram encontrados por Ribeiro et al. (2016) ao utilizar também o pó de pedra como substituição, avaliando suas propriedades mecânicas. Aqui, foi observado um melhor desempenho na argamassa produzida com 50% de pó de pedra, tanto no quesito resistência (relação água/aglomerante menor que as demais) como no de absorção, significando uma argamassa durável e resistente.

Ao utilizar o resíduo de EVA (*Ethylene vinyl acetate*) em substituição parcial ao agregado miúdo, os pesquisadores tiveram como resultado, uma redução na resistência mecânica a partir do aumento da porcentagem do resíduo, provavelmente porque, quanto maior o teor de EVA, menor o teor de água livre para reagir na hidratação do cimento, havendo uma tendência de atração eletrostática entre EVA e água, fazendo com que o EVA absorva água. Em contrapartida, houve uma redução na absorção, originando uma matriz menos porosa, em que o resíduo preenche os espaços vazios deixados pelo agregado natural, e que não foram preenchidos pela pasta de cimento, apresentando assim, viabilidade de produção, tornando-se necessário avaliar parâmetros de aplicação para cada finalidade da argamassa (ANDRADE E GUIMARÃES, 2017).

Ao utilizar o resíduo de polimento de porcelanato em argamassas de restauro à base de cal, foi observado que a substituição da areia por esse resíduo resultou numa maior densidade e compacidade em consequência da diminuição no teor de ar incorporado, verificou-se também que as concentrações entre 10 e 20% apresentaram melhor conjunto de propriedades no estado endurecido, com ganho em retração livre, maior resistência mecânica e aderência, sendo assim, argamassas com melhor desempenho que sugerem maior durabilidade, contribuindo assim, para um efetivo restauro (BREITEBACH et al., 2017).

Em trabalho realizado por Couto et al. (2018), ao incorporar cinza de madeira de eucalipto (CME) em substituição parcial da areia, avaliando as propriedades das argamassas, foi observado viabilidade significativa, sem afetar as propriedades estudadas a porcentagem de até 10% de inclusão do resíduo, resultando significativamente na resistência mecânica devido a um possível efeito filler preliminar, provocado pela presença de material pulverulento na CME, capaz de manter essa equivalência de resistência. Também foi observado que, apesar da necessidade de elevação da relação água/cimento para que a argamassa com 10% de CME mantivesse o mesmo índice de consistência da argamassa de referência, tal fato não provocou elevação significativa em sua capacidade de absorção de água e, tampouco, no índice de vazios, características importantes em termos de durabilidade dos compósitos.

Dias (2018), ao avaliar o desempenho termomecânico de argamassas com adição de resíduos de vermiculita para construções rurais, verificou a relevante influência da quantidade de finos do resíduo, o que acarretou uma melhoria na resistência à compressão em substituição de até 60%, bem como uma eficiência no gradiente térmico

de 40% a mais, quando comparado aos resultados obtidos na argamassa de referência. A autora justifica tal fato pelas características físicas do resíduo de vermiculita, que tende a absorver mais água, indicando possuir mais espaços vazios (ar), favorecendo a melhoria no isolamento térmico da argamassa, quando comparada à que não contém o resíduo.

Ao utilizar o mesmo resíduo de vermiculita (sendo em *in natura* e calcinado) e avaliar sua influência no estado endurecido da argamassa, Rojas-Ramirez et al. (2019) verificaram que houve indicativo de que o aumento do teor de resíduo de vermiculita resultou em diminuição da porosidade aparente da argamassa, quando utilizado de forma calcinada; bem como uma diminuição do módulo de elasticidade, em função do aumento do teor do resíduo, sendo mais intensa para as argamassas, com o uso do resíduo *in natura* redução também constatada na resistência à tração, por compressão diametral, o uso do resíduo calcinado resultou em uma microestrutura com poros menores do que a obtida com a composição de mesma proporção de substituição (20%) ao natural, obtendo um módulo de elasticidade maior, auxiliando no suporte de cargas, sem se deformar permanentemente.

Com o objetivo de analisar as propriedades físicas e mecânicas da argamassa com adição de cinza volante e diferentes concentrações de borracha para revestimento de edificações, Pcziecsek (2017) certificou-se de que o uso da borracha contribuiu para o aumento no teor de ar incorporado e na redução da massa específica, tornando a argamassa mais trabalhável, favorecendo também, com relação à resistência à tração na flexão, o que não foi observado na resistência à compressão. Já a adição da cinza após moagem, apresentou maior atividade pozolânica, proporcionando um aumento na resistência mecânica, além disso, a argamassa contendo cinza volante foi menos vulnerável ao ataque por sulfato de sódio. Sendo assim, viável o uso das argamassas como revestimento em paredes internas e externas de edificações.

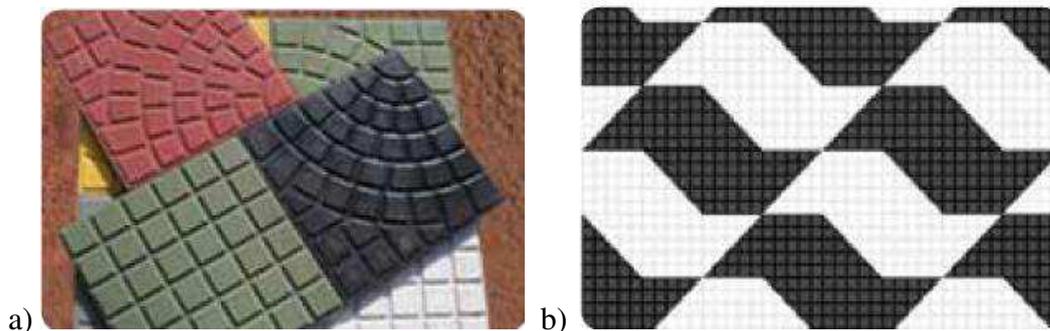
Ao inserir o resíduo do corte de rochas ornamentais (RCRO) gerado no processo de fabricação de chapas, analisando assim, sua viabilidade técnica e econômica de argamassas de revestimento, Vinco et al. (2017) apuraram melhora nas propriedades de retenção de água e de consistência, pois o RCRO possui finura equivalente à do cimento e, portanto, contribui para a colmatação dos poros da argamassa, bem como uma tênue tendência de crescimento nas resistências à compressão e tração, possivelmente, devido à colmatação dos poros pelo RCRO e, também, à alta retenção de água dos traços. Com

a adição do RCRO, o consumo de cimento é reduzido, o que gera menor custo de produção da argamassa, tornando-se, assim, mais viáveis economicamente, que um traço que é comumente utilizado em obra.

3.7 Ladrilho hidráulico (placa para piso de passeio)

O ladrilho hidráulico é um material cimentício usado em revestimento de piso interno e externo, sendo composto por cimento Portland, agregados, água, aditivos e pigmentos, segundo a NBR NM 9457 (ABNT, 2013). Por ser uma peça que não passa por nenhum processo de queima, e ser apenas molhada, recebeu essa denominação de “hidráulico” (Figura 03).

Figura 03: Exemplos de ladrilhos hidráulicos: a) Ladrilhos com textura e colorido; b) Ladrilho com mapa de São Paulo.



Fonte: ABCP - Manual do Ladrilho Hidráulico, 2010.

Atualmente, encontram-se diversos tipos de ladrilhos no mercado, destinados a compor o piso de passeio propriamente dito, sejam eles de textura mais lisa ou em relevo, retangular ou quadrado, colorido ou não, podotátil (amplamente utilizado para sinalização tátil de calçadas), entre outros (Figura 04).

Figura 04: Exemplos de ladrilhos hidráulicos com texturas diversificadas e função antiderrapante.



Fonte: Dalle Piagge Ladrilhos hidráulicos, 2021.

Sua principal característica é a alta resistência a zonas de tráfego intenso, aliando características antiderrapantes e de alta resistência à abrasão, o que o torna indicado para calçadas, pátios, praças, garagens, etc. (ABCP - Manual Ladrilho Hidráulico, 2010).

A norma que fixa as condições exigíveis para os ladrilhos hidráulicos é a NBR NM 9457 (ABNT, 2013) e especifica dimensões mínimas de aproximadamente 200mm x 200mm (podendo variar em espessura). Além dessa norma, ainda há a NBR NM 9458 (ABNT, 1986) que se refere ao assentamento dos ladrilhos; a NBR NM 9459 (ABNT, 1986) que padroniza formatos e dimensões, e ainda a NBR NM 13818 (ABNT, 1997) amplamente utilizada devido a sua especificação e métodos de ensaios descritos.

Para a primeira opção de formulação (prensada), os ladrilhos são compostos de 3 camadas, segundo a NBR NM 9457 (ABNT, 2013), em que consta que: a camada inferior é a superfície destinada ao assentamento (10 mm de espessura) e deve ser constituída de material mais poroso que auxilie em sua aderência; a camada intermediária absorve a água em excesso da camada superior e fixa a sua característica “artística”, possui cerca de 5 mm de espessura (fica entre a camada inferior e superior); e a camada superior, a qual apresenta textura mais lisa ou em relevo, colorido ou não (camada de impressão “artística”), é caracterizada em ser mais fluida, com cerca de 5 mm de espessura.

Abaixo na Figura 05, temos a sequência de como os ladrilhos hidráulicos prensados são executados:

Figura 05: Sequência da fabricação do ladrilho hidráulico prensado



Fonte: ABCP - Manual do Ladrilho Hidráulico, 2010.

O outro meio possível de formulação do ladrilho hidráulico não utiliza prensa e sim, um molde respeitando as dimensões prescritas na norma, que é preenchido em camada única composta pela mistura de cimento, areia, brita e água ou cimento, areia e água (DRUMOND, FERREIRA et al., 2018), sendo submetido, em seguida, ao processo de vibração para seu devido adensamento (DESTEFANI, 2013), podendo ser manual ou de forma mecânica (mesa vibratória), com frequência e tempo definidos. Esses moldes são encontrados com tamanhos e texturas variáveis comercialmente (Figura 06).

Figura 06: Exemplos de moldes com texturas e dimensões disponíveis comercialmente



Fonte: PEC MAQ PEC Formas, 2021.

Na literatura, encontram-se diversas pesquisas com a utilização de resíduos para compor o ladrilho hidráulico vibrado, a fim de substituir parcialmente o agregado.

Em Moura, Gonçalves e Leite (2002), o resíduo de corte de mármore e granito foi inserido na argamassa para produção de ladrilho hidráulico, denominado de "lajota de piso", tendo sido observado uma facilidade de mistura dos materiais e o aspecto visual do ladrilho pronto se mostrou melhor do que o das lajotas de piso produzidas sem resíduo.

Em pesquisa destinada à incorporação do resíduo de madeira em ladrilho hidráulico vibrado, foi constatado por Savazzini-Reis e Fagundes (2020), a viabilidade de incorporar 5% de resíduo de madeira na confecção do ladrilho hidráulico vibrado e manter as propriedades mecânicas, quando comparado ao ladrilho de referência.

Já em outro estudo, visando a fabricação do ladrilho hidráulico piso tátil, em uma única camada e por processo de vibração, facilitando, assim, a produção deste produto e, conseqüentemente, reduzindo custos, Destefani (2013) incluiu, à sua pesquisa, o resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais, obtendo resultados de absorção de água, módulo de resistência à flexão e aspectos dimensionais, em conformidade com as exigências das normas técnicas brasileiras, diferentemente dos ladrilhos hidráulicos tátil de referência comparados na pesquisa.

Vale ressaltar a necessidade de manutenção para que se tenha durabilidade das peças e do piso em geral, garantindo sua vida útil, devendo ser feita periodicamente, seja de maneira que vise prevenir, por meio de lavagens, ou, até mesmo, por meio de medidas que corrijam algum defeito pontual presente, por exemplo, através de substituição de peças, caso necessário.

4. MATERIAL E MÉTODOS

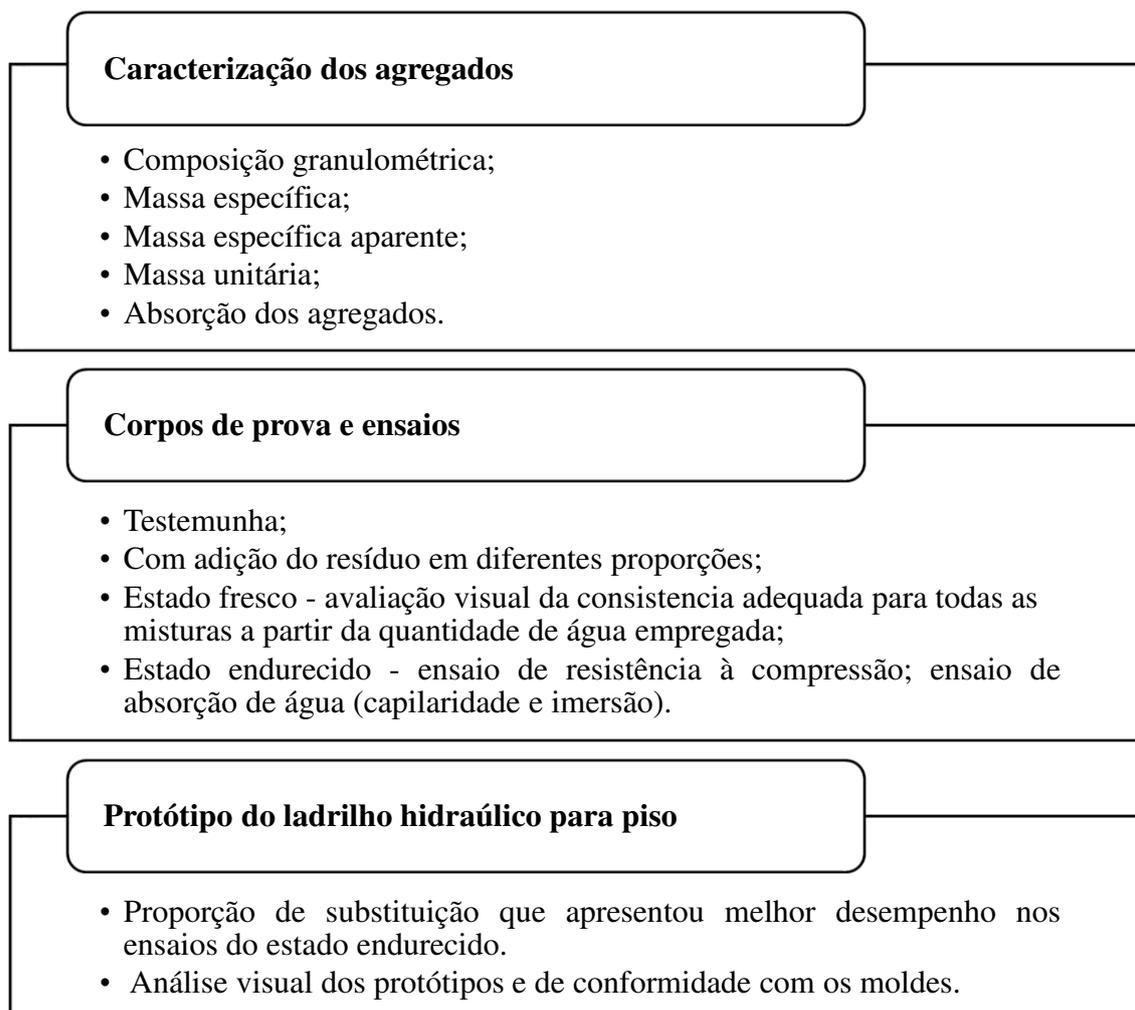
O trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (LACRA), pertencente à Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande – PB.

Para o desenvolvimento do trabalho, o cimento utilizado foi o CP V-ARI, devido a seu alto grau de pureza (sem adições) e ao curto processo de cura, permitindo um rápido desmolde, alta resistência inicial e melhor desempenho às peças produzidas. Como agregado miúdo, foi utilizada a areia artificial (pó de pedra), a qual foi substituída parcialmente pelo resíduo de vermiculita (material objetivo do estudo em questão).

A pesquisa foi dividida em três etapas. A primeira destinou-se à caracterização dos materiais utilizados, no intuito de identificar e reconhecer suas propriedades físicas.

Na segunda, houve a análise da consistência ideal das argamassas visualmente, por meio da adição crescente da quantidade de água necessária à mistura, a partir do aumento das substituições do resíduo de vermiculita empregado, no intuito de obter a mesma trabalhabilidade em todas as argamassas. Em seguida, foram moldados os corpos de prova do tipo testemunha, juntamente com os demais corpos de provas que continham a adição do resíduo de vermiculita, em substituição parcial à areia artificial (pó de pedra), a fim de analisar como as diferentes proporções empregadas em sua produção influenciaram nas características propostas dos ensaios aos quais foram submetidos.

A terceira etapa foi atribuída à confecção de um protótipo de uma placa que constituiria o piso de passeio, com a proporção que apresentou melhor desempenho, conciliado a todos os ensaios no estado endurecido que foram realizados, conforme esquematizado na Figura 07 abaixo:

Figura 07: Esquematização das etapas

4.1 Aquisição do material

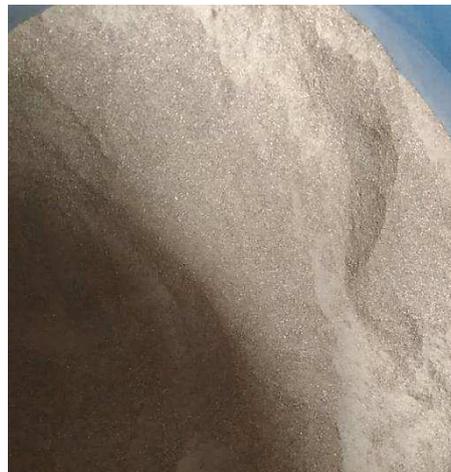
O aglomerante utilizado foi o CP V-ARI max da Cimento Nacional e o agregado miúdo foi a areia artificial (Figura 08), ambos encontrados comercialmente na cidade de Campina Grande – PB.

Figura 08: Cimento Portland V – ARI e Areia artificial (pó de pedra)



O resíduo de vermiculita (Figura 09) foi disponibilizado pelo LACRA/UFCG, proveniente da empresa Mineração Pedra Lavrada Ltda (MPL), situada na cidade de Santa Luzia – PB. O material é oriundo de processo de beneficiamento, não possui aplicação comercial ficando, assim, amontoado dentro da propriedade.

Figura 09: Resíduo de Vermiculita



A água para o preparo das argamassas foi disponibilizada pela Universidade Federal de Campina Grande, proveniente da Companhia de Água e Esgoto da Paraíba (Cagepa).

4.2 Caracterização dos materiais

Após a coleta do material, para fase inicial, tornou-se necessária uma caracterização dos agregados. Para isso, seguiu-se as normas específicas para tais procedimentos. A NBR NM 248 (ABNT, 2003) prescreve o método para a determinação da composição granulométrica de agregados miúdos e graúdos para concreto, necessário para o conhecimento dos grãos constituintes dos agregados, visto que influencia diretamente na compactidade e resistência da argamassa, aos esforços mecânicos.

4.2.1 Granulometria

Para o ensaio granulométrico, foi utilizado o conjunto de peneiras da série normal, seguindo a sequência de malhas 4,8 mm, 1,2 mm, 0,6 mm, 0,3 mm e 0,15 mm, juntamente com um fundo coletor. Foi separado 500g da areia artificial, posto sobre as peneiras, levadas em seguida à agitação mecânica, por um período de aproximadamente 7 min (Figura 10), repetindo o mesmo processo para o resíduo de vermiculita.

Figura 10: Ensaio de granulometria



Caracterizando posteriormente a porcentagem retida (Figura 11) e acumulada em cada peneira, a dimensão máxima e o módulo de finura do agregado (soma das porcentagens retidas acumuladas nas peneiras, dividida por 100), obtendo assim, os dados granulométricos dos agregados miúdos.

Figura 11: Distribuição da areia artificial retida no conjunto de peneiras.



4.2.2 Massa específica

As massa específica e massa específica aparente dos agregados miúdos (areia artificial e o resíduo de vermiculita) foram determinadas seguindo todas as etapas conforme a NBR NM 52 (ABNT, 2003) específica, utilizando as fórmulas necessárias para a obtenção dos valores requeridos:

$$V_a = \frac{m_2 - m_1}{P_a} \quad (\text{Equação 1})$$

Onde: V_a é o volume de água adicionada ao frasco (cm^3); m_1 é a massa do conjunto (frasco + agregado); m_2 é massa total (frasco + agregado + água); P_a , é a massa específica da água (g/cm^3).

$$d_1 = \frac{m}{V - V_a} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde: d_1 é a massa específica aparente; m é a massa da amostra seca em estufa (g); V é volume do frasco (cm^3); V_a é o volume de água adicionada ao frasco (cm^3).

$$d_2 = \frac{m_s}{V - V_a} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde: d_2 é a massa específica do agregado saturado superfície seca (g/cm^3); m_s é a massa da amostra da condição saturada superfície seca (g); V é volume do frasco (cm^3); V_a é o volume de água adicionada ao frasco (cm^3).

$$d_3 = \frac{m}{(V - V_a) - \frac{m_s - m}{P_a}} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde: d_3 é a massa específica

4.2.3 Massa unitária

Para adquirir a massa unitária, foi seguido o Método C encontrado na NBR NM 45 (ABNT, 2006) correspondente aos agregados utilizados (Figura 12), fazendo-se o uso da seguinte fórmula:

$$P_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (\text{Equação 5})$$

Onde: m_r é a massa do recipiente vazio (kg); m_{ar} é a massa do recipiente + o agregado(kg); V é o volume do recipiente em m^3

Figura 12: Ensaio de massa unitária da areia artificial



4.2.4 Absorção de água

Os agregados miúdos passaram pelo ensaio de absorção de água, conforme descrito pela NBR NM 30 (ABNT, 2001), calculados de acordo com a fórmula:

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (\text{Equação 6})$$

Onde: A, é a absorção de água (%); m_s é a massa ao ar da amostra na condição saturado e de superfície seca (g); m, é a massa da amostra seca em estufa (g).

4.3 Produção das argamassas

O traço inicialmente definido e usualmente utilizado para a formulação de argamassas foi 1:4 (cimento; areia artificial), calculado em massa; já os teores de substituição da areia artificial por resíduo de vermiculita foram de 0%, 10%, 30% e 50%.

A areia artificial, antes de ser incorporada à mistura, passou por processo de peneiramento, sendo utilizado o material passante da peneira 1,2 mm, a fim de aproximar--se, medianamente, da granulometria do resíduo de vermiculita, adequando-se e se complementando melhor à mistura, no momento da substituição.

Houve uma predefinição do fator água/cimento, no valor de 0,60 inicialmente, que, assim como o traço, também é amplamente utilizado para a preparação de argamassas, porém, devido às características da areia artificial e do resíduo de vermiculita, esse valor foi adaptado, ao decorrer do preparo, visto que houve a necessidade do acréscimo de água (0,5 ml gradualmente até a chegada da mesma consistência para todas as argamassas) tanto para a argamassa testemunha (0%) quanto para as demais que continham o resíduo, conforme pode ser observado na Tabela 02:

Tabela 02: Quantificação geral do material utilizado para a formulação das argamassas no traço 1:4 e seu respectivo fator água/aglomerante.

0%	10%	30%	50%
3 kg de cimento	3 kg de cimento	3 kg de cimento	3 kg de cimento
12 kg de areia artificial	10.800 kg de areia artificial	8.400 kg de areia artificial	6 kg de areia artificial
0 kg de resíduo	1.200 kg de resíduo	3.600 kg de resíduo	6 kg de resíduo
Fator a/c: 0,9	Fator a/c: 1,03	Fator a/c: 1,1	Fator a/c: 1,18

4.4 Produção dos corpos de prova

Prosseguindo com o procedimento experimental, com a formulação das argamassas, foram confeccionados os corpos de provas cilíndricos de dimensões de 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, sendo untada toda a superfície interna e o fundo do molde com uma leve camada de óleo, respeitando o preenchimento do molde em quatro camadas de alturas aproximadamente iguais, recebendo, cada camada, 30 golpes uniformes com o soquete, homogeneamente distribuídos (NBR 7215, 1996), de acordo com a Figura 13.

Figura 13: Corpos de prova



Para cada proporção de resíduo (0%, 10%, 30% e 50%) foram utilizados 4 corpos de prova para testes de resistência à compressão (NBR 7215, 1996), 4 para ensaio de absorção de água por imersão (NBR 9778, 2009), 4 para absorção de água por capilaridade (NBR 9779, 2012), em que foram avaliados aos 7, 14 e 21 dias, após o processo de cura no laboratório (Figura 14), como representado na Tabela 03.

Figura 14: Cura dos corpos de prova



Tabela 03: Porcentagens com seus respectivos ensaios e tempos de cura, de acordo com a quantidade de corpos de prova formulados.

	7 DIAS	14 DIAS	21 DIAS
0% - R. C. (4cp) - A. I. (4cp) - A. C. (4cp)	12 CP	12 CP	12 CP
10% - R. C. (4cp) - A. I. (4cp) - A. C. (4cp)	12 CP	12 CP	12 CP
30% - R. C. (4cp) - A. I. (4cp) - A. C. (4cp)	12 CP	12 CP	12 CP
50% - R. C. (4cp) - A. I. (4cp) - A. C. (4cp)	12 CP	12 CP	12 CP
TOTAL	144 CP cilíndricos (100x50mm)		

- R.C. = Resistência à compressão; - A.I. = Absorção por imersão; - A.C. = Absorção por capilaridade

4.5 Caracterização das argamassas em estado endurecido

4.5.1 Resistência à compressão

Para ensaio de resistência à compressão, foram utilizados 4 corpos de prova de cada porcentagem, a cada tempo de cura (7, 14 e 21 dias), totalizando cerca de 48 corpos de provas rompidos, seguindo criteriosamente a NBR NM 7215 (ABNT, 1996).

Para a execução do ensaio, os corpos de provas após desmoldados, eram postos dentro d'água e ensaiados a cada tempo de avaliação, como citado anteriormente, eram retirados da água, colocados para a secagem ao ar livre, em um certo período de tempo. Em seguida, eram pesados, medidos em 3 pontos (a fim de se obter o diâmetro médio da seção transversal), por meio de paquímetro digital (Figura 15), e rompidos em uma prensa hidráulica marca CONTENCO, modelo Pavitest, com capacidade de 0 a 24000kgf (Figura 16).

Figura 15: Medição por meio de paquímetro digital



Figura 16: Prensa CONTENCO

Para a obtenção da tensão suportada (MPa – megapascal), utilizou-se a conversão da carga encontrada na prensa em kgf para N, tendo sido dividido pelo diâmetro médio da seção transversal do corpo de prova em m^2 , resultando um valor em Pa, sendo convertido a MPa, conforme esquematizado na Figura 17.

Figura 17: Esquematização da obtenção da tensão suportada em MPa

O diâmetro médio encontrado por meio dos 3 pontos medidos dos corpos-de-prova cilíndricos, foi a partir da Equação 7.

$$S = \frac{(3,1416 \times D^2)}{4} \quad (\text{Equação 7})$$

Onde: S é o diâmetro médio da seção transversal (m^2); D é a média dos valores dos 3 pontos encontrados do corpo de prova (m).

Com a execução do ensaio e obtenção das cargas suportadas, avaliou-se a eficiência do ensaio de resistência, a partir do coeficiente de variação dos resultados

(CVe). Antes dessa etapa, encontrou-se o desvio-padrão (S_e) do ensaio pela média das amplitudes dos resultados dos exemplares, dividida pelo coeficiente d_2 multiplicado pelo o número de corpos de prova utilizados (n) relacionado na Tabela 04, (NBR 5739, 2018), conforme Equação 8.

$$s_e = \frac{\sum_{i=1}^n A_i}{d_2 \cdot n}$$

(Equação 8)

Onde: A_i é a amplitude dos resultados (valor maior – valor menor em MPa do corpo de prova).

Tabela 04: Coeficiente d_2

Quantidade de corpos de prova	Coeficiente d_2
2	1,128
3	1,693
4	2,059
5	2,326
6	2,534

Fonte: NBR NM 5739 (ABNT, 2018)

Adiante, calcula-se o coeficiente de variação (CVe), dividindo o S_e encontrado pela resistência média da amostra (f_{cm}), multiplicado por 100 para que o valor seja dado em %. Expresso pela Equação 9:

$$CVe = \frac{S_e}{f_{cm}} \times 100 \quad \text{(Equação 9)}$$

Por fim, com o valor do CVe, é feita a avaliação por meio de conceito, seguindo os valores tabelados descritos pela norma (Tabela 05):

Tabela 05: Avaliação do ensaio por meio do CVe encontrado

COEFICIENTE DE VARIAÇÃO (CVe) %	
Nível 1 – Excelente	$CVe \leq 3,0$
Nível 2 – Muito bom	$3,0 < CVe \leq 4,0$
Nível 3 – Bom	$4,0 < CVe \leq 5,0$
Nível 4 – Razoável	$5,0 < CVe \leq 6,0$
Nível 5 – Deficiente	$CVe > 6,0$

Fonte: NBR NM 5739 (ABNT, 2018)

4.5.2 Absorção de água por imersão

Para o ensaio de absorção por imersão, foram utilizados 4 corpos de prova de cada porcentagem, a cada tempo de cura (7, 14 e 21 dias), totalizando cerca de 48 corpos de provas, seguindo a NBR NM 9778 (ABNT, 2009).

Os corpos de prova foram retirados da água, deixados ao ar livre em um determinado tempo e, logo após, foram postos na estufa por 24h, na temperatura de 105°C, a fim de evaporar toda água absorvida (Figura 18).

Figura 18: Corpos de prova submetidos à secagem em estufa



Passado esse tempo, foi feita a pesagem seca para, posteriormente, imergi-los na água e deixá-los por 72h (Figura 19) até a nova pesagem, calculando assim, a porcentagem absorvida pelo corpo de prova, a partir da seguinte Equação 10:

$$\frac{M_{sat} - M_s}{M_s} \quad (\text{Equação 10})$$

Onde: M_{sat} = massa do corpo-de-prova saturado (A); M_s = massa do corpo-de-prova seco em estufa (B).

Figura 19: Corpos de prova submetidos à imersão por 72h.



4.5.3 Absorção por capilaridade

Para o ensaio de absorção por capilaridade, foram utilizados 4 corpos de prova de cada porcentagem, a cada tempo de cura (7, 14 e 21 dias), totalizando cerca de 48 corpos de provas, seguindo a NBR NM 9779 (ABNT, 2012).

Os corpos de prova para o ensaio de capilaridade passaram pelas mesmas etapas que os corpos de prova que foram submetidos ao ensaio de imersão (ar livre → estufa 105°C → pesagem → colocados na água), porém, ficaram sobre uma lâmina d'água constante de 5 mm durante 72h (Figura 20). Após esse período, foram pesados e a medição realizada, de 3 pontos do corpo de prova, para obter a média diametral em cm² da sua seção transversal.

Figura 20: Corpos de prova com uma das faces em contato com a água por 72h.



Ao obter os dados, tanto de pesagem seca e úmida, além do diâmetro médio, foi utilizada a seguinte equação para obtenção do valor da absorção por capilaridade, em g/cm^2 .

$$C = \frac{A-B}{S} \quad (\text{Equação 11})$$

Onde: C = absorção de água por capilaridade, em g/cm^2 ; A = massa do corpo-de-prova que permanece com uma das faces em contato com a água durante 72h (g); B = massa do corpo-de-prova seco, assim que este atingir a temperatura de $(23 \pm 2)^\circ\text{C}$ (g); S = área da seção transversal, em cm^2 .

4.6 Produção do protótipo de ladrilho hidráulico

Com a argamassa que apresentou o melhor desempenho físico-mecânico, para a proporção de resíduo de vermiculita adicionado à mistura, produziu-se um protótipo de ladrilho hidráulico utilizado para compor o piso de passeio.

As amostras foram feitas com o uso de moldes (Figura 21) vendidos comercialmente e com dimensões preestabelecidas (32cm x 32cm x 2,5cm).

Figura 21: Molde utilizado para a formulação do protótipo (32cm x 32cm x 2,5cm)



Antes da preparação da argamassa, foi passado o desmoldante em toda a extensão do molde plástico, a fim de auxiliar na retirada da placa após as 24h da sua moldagem.

Após formulação, o ladrilho passou por avaliação visual e dimensional conforme especificado pela NBR NM 13818 (ABNT, 1997) que está diretamente ligada ao produto final, verificando se as peças coincidem com os moldes e se a qualidade da superfície aparente foi alcançada uniformemente.

4.7 Delineamento Estatístico

Os dados obtidos nos testes foram analisados segundo um delineamento inteiramente casualizado, adotando um esquema fatorial 4 x 3 (quatro porcentagens de substituição da areia artificial por resíduo de vermiculita – 0%, 10%, 30% e 50%; em três tempos de cura – 7, 14 e 21 dias), sendo que, para cada porcentagem de substituição de resíduo, foram utilizados 4 corpos de prova para testes de resistência à compressão, 4 para testes de absorção por imersão e 4 para testes de absorção por capilaridade no estado endurecido da argamassa, totalizando 144 unidades.

O teste de comparação de médias (teste de Tukey) ao nível de 5% de probabilidade, realizados através do programa ASSISTAT 7.7 (2016).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização dos materiais

5.1.1 Granulometria dos agregados

Optou-se pela utilização da areia artificial (pó de pedra), devido à problemática ambiental de preservação dos agregados naturais.

A necessidade de caracterizar um agregado tem total influência na qualidade final da argamassa, bem como em sua resistência e compacidade, daí o interesse em conhecer as parcelas constituídas de grãos de cada diâmetro, expressas em função da massa total do agregado (MENOSSE, 2004).

Ao caracterizar a areia artificial conforme sua granulometria, foi possível determinar, de acordo com os dados analisados, o diâmetro máximo de partículas de 4,8 e o módulo de finura de 2,48, como pode ser visualizado na Tabela 06 em seguida.

Tabela 06: Caracterização granulométrica da areia artificial.

PENEIRA (mm)	PESO (g)	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA	% QUE PASSA
(n° 4) 4,8	1,46	0,3	0,3	99,7
(n° 8) 2,4	69,38	13,9	14,2	85,8
(n° 16) 1,2	96,18	19,2	33,4	66,6
(n° 30) 0,6	76,88	15,4	48,8	51,2
(n° 50) 0,3	91,73	18,3	67,1	32,9
(n° 100) 0,15	87,47	17,5	84,6	15,4
FUNDO	76,90	15,4	-	-
DIÂMETRO MÁXIMO:		4,8		
MÓDULO DE FINURA:		2,48		

A areia artificial utilizada possui uma distribuição granulométrica que permite ser classificada como uma areia média, de acordo com os limites estabelecidos na NBR NM 7211 (ABNT, 2005), encontrando-se, assim, na faixa 3 de classificação (Tabela 07), constando o material retido acumulado da peneira 0,6.

Tabela 07: Faixa de classificação para o agregado miúdo

Porcentagem retida acumulada, em massa				
Peneiras (mm)	Faixa 1 (muito fina)	Faixa 2 (fina)	Faixa 3 (média)	Faixa 4 (grossa)
6,3	0 – 3	0 – 7	0 – 7	0 – 7
4,8	0 – 5	0 – 10	0 – 11	0 – 12
2,4	0 – 5	0 – 15	0 – 25	5 – 40
1,2	0 – 10	0 – 25	10 – 45	30 – 70
0,6	0 – 20	21 – 40	41 – 65	66 – 85
0,3	50 – 85	60 – 88	70 – 92	80 – 95
0,15	85 – 100	90 – 100	90 – 100	90 – 100

Fonte: NBR NM 7211 (ABNT, 2005)

Além da areia artificial, o ensaio de granulometria também foi realizado para o resíduo de vermiculita, resultando nos dados apresentados na Tabela 08, no qual foi possível obter o módulo de finura e diâmetro máximo, com os valores de 1,12 e 0,6, respectivamente.

Tabela 08: Caracterização granulométrica do resíduo de vermiculita.

PENEIRA (mm)	PESO (g)	% RETIDA	% RETIDA ACUMULADA	% QUE PASSA
(n° 4) 4,8	0,00	0,00	0,00	100,00
(n° 8) 2,4	0,00	0,00	0,00	100,00
(n° 16) 1,2	0,00	0,00	0,00	100,00
(n° 30) 0,6	0,11	0,02	0,02	99,98
(n° 50) 0,3	149,91	30,00	30,02	69,98
(n° 100) 0,15	258,07	51,61	81,62	18,38
FUNDO	91,91	18,40	-	-
DIÂMETRO MÁXIMO:		0,6		
MÓDULO DE FINURA:		1,12		

De acordo com os dados, observa-se uma maior concentração do resíduo presente nas peneiras 0,15 mm e 0,3 mm (Dias, 2018), sendo possível classificar o resíduo de vermiculita conforme seu diâmetro máximo (0,6) como um agregado de dimensão fina, conforme observado na classificação apresentada por Lopes Neto (2017) na Tabela 09. Constatando que tal dimensão promove classificá-lo também conforme a NBR NM 7211 (2005) de agregado muito fino, encontrando-se na Faixa 1, como pode ser verificado na Tabela 07 apresentada anteriormente.

Tabela 09: Classificação granulométrica dos agregados miúdos

Agregado	Dimensão da partícula (mm)
Muito fino	0,15 a 0,3
Fino	0,3 a 0,6
Médio	0,6 a 1,2
Grosso	1,2 a 4,8
Material pulverulento	Inferior a 0,15

Fonte: Lopes Neto (2017).

5.1.1.1 Análise geral dos resultados granulométricos

Segundo Mehta e Monteiro (2008), a dimensão máxima e o módulo de finura do agregado apresentam uma relação de igual proporção, ou seja, quanto maior o módulo de finura, mais partículas graúdas apresenta o agregado.

O que foi diretamente observado nesse trabalho, ao comparar os resultados das análises de granulometria da areia artificial e do resíduo de vermiculita, foi que, devido à presença expressiva de material fino em sua composição, o resíduo apresentou-se com dados inferiores de dimensão máxima e módulo de finura em relação aos dados obtidos da areia artificial, que é considerada, de acordo com a classificação granulométrica, de areia média.

Feita a análise granulométrica, optou-se por utilizar, na produção das argamassas, a areia artificial que possuísse as mesmas características de granulometria referentes à quantidade retida na peneira 0,6 mm. Com isso, houve o peneiramento de todo o material para adquirir tal particularidade.

O mesmo processo de peneiramento do material foi executado com o resíduo de vermiculita que, ao apresentar características aproximadas em termos granulométricos à da areia artificial, foi utilizado na substituição da areia nas argamassas, sendo assim, usado o resíduo que se assemelhou ao retido na peneira 0,3 mm.

As partículas menores se encaixam nos vazios deixados pelas partículas médias, em que estas últimas ocupam os vazios das partículas maiores. Diante disso, os grãos dos agregados tendem a se complementar, promovendo uma melhor densidade de empacotamento, devido ao fato de que suas granulometrias se assemelhem.

A densidade do empacotamento pode ser aumentada, à medida que as partículas menores são introduzidas e distribuídas entre os interstícios das partículas maiores, resultando assim, em um efeito imediato na diminuição da porosidade e tamanho de poros. Porém, se o preenchimento total for atingido, qualquer excesso de fino pode possibilitar uma reação contrária, fazendo com que haja afastamento dos grãos maiores e, provocando assim, o surgimento de novos poros e diminuição na densidade de empacotamento (CAMPOS, 2015).

A distribuição granulométrica tem influência direta na trabalhabilidade no estado fresco, pois agregados miúdos muito grossos podem produzir misturas ásperas e não trabalháveis. Já uma alta porcentagem de material fino exige aumento de água de amassamento, o que reflete na absorção e pode comprometer mecanicamente a argamassa quando essa se apresentar no estado endurecido (MENOSSI, 2004; SBRIGHI NETO, 2011).

5.1.2 Massa unitária dos agregados

A massa unitária consiste no parâmetro mais importante para a quantificação da demanda de água das argamassas, tendo em vista também sua relevância a respeito da influência do tipo de agregado nas propriedades de argamassas no estado fresco e endurecido (SHUTTER e POPPE, 2004).

Os valores de massa unitária da areia artificial e do resíduo de vermiculita são listados na Tabela 10 abaixo:

Tabela 10: Massa unitária dos agregados

Agregado alternativo	Massa unitária (g/cm³)
Areia artificial	1,56
Resíduo de Vermiculita	1,22

Carasek et al. (2016) constataram, em sua pesquisa, que o aumento da massa unitária do agregado implica em um aumento proporcional da fluidez (índice de consistência) da mistura, levando em conta o fator de empacotamento do conjunto particular de agregados, bem como tudo aquilo que interfere neste parâmetro, como o tipo de distribuição dos grãos, a forma e a geometria das partículas, os teores de finos, etc.

Já os agregados que apresentam menor massa unitária geram um menor fator de empacotamento, conseqüentemente, altos valores de porosidade e índice de vazios, havendo um arranjo inadequado entre as partículas, necessitando de uma alta demanda

por água da argamassa que, posteriormente, pode provocar retração da argamassa (CARASEK et al., 2018).

Diante disso, com os resultados obtidos nessa pesquisa, observa-se na tabela de referência, Tabela 10, que a areia artificial apresenta massa unitária maior ($1,56 \text{ g/cm}^3$) que a do resíduo de vermiculita ($1,22 \text{ g/cm}^3$). O valor de massa unitária da areia artificial assemelhou-se, aproximadamente, a valores encontrados por outros pesquisadores ao utilizar areia natural em suas composições, tais como $1,51 \text{ g/cm}^3$, $1,55 \text{ g/cm}^3$ e $1,63 \text{ g/cm}^3$, de acordo com Aguiar (2017), Dias (2018) e Tokarski et al. (2018), respectivamente.

Assim, o resíduo, por possuir um valor menor de massa unitária, pode contribuir para o preenchimento dos poros presentes entre a areia artificial e o aglomerante, favorecendo o empacotamento dos grãos, formando um bom arranjo, levando em consideração também, o formato de suas partículas. De forma geral, a massa unitária é considerada um expressivo parâmetro determinante de aspectos reológicos e de trabalhabilidade das argamassas.

5.1.3 Massa específica e absorção dos agregados

De acordo com a Tabela 11, é possível observar que a massa específica do resíduo de vermiculita ($3,59 \text{ g/cm}^3$) apresenta-se maior que a da areia artificial ($2,40 \text{ g/cm}^3$), sendo este último valor também encontrado por Matos, Allem e Piva (2017), ao caracterizar a areia artificial, a fim de utilizá-lo na substituição da areia natural em sua pesquisa. Desempenho semelhante também foi encontrado por Dias (2018), em seu estudo, ao analisar o resíduo de vermiculita e a areia natural, no qual afirma que a massa específica do agregado é diretamente proporcional ao teor de finos do material e inversamente proporcional à porosidade da argamassa.

Ou seja, os resultados salientam o efeito da quantidade de finos presentes no material, uma vez que seguem o mesmo padrão percebido no ensaio anterior. O teor de finos constituintes do resíduo tende a contribuir em conjunto com a areia artificial até certo limite, preenchendo os vazios existentes.

Tabela 11: Massa específica e capacidade de absorção da areia artificial e do resíduo de vermiculita.

	Massa específica (g/cm ³)	Absorção (%)
Areia artificial	2,40	0,42
Resíduo de Vermiculita	3,59	15,22

A influência elevada da proporção de finos, podendo também considerar a forma dos grãos que constituem o resíduo de vermiculita, tende a promover uma maior absorção, podendo favorecer o surgimento de poros, como é constatado na Tabela 11 acima, que por sua vez, influencia na perda de trabalhabilidade da argamassa fresca, corroborando com Sbrighi Neto (2011) que afirma que a quantidade máxima de absorção de água do agregado está relacionada com a porosidade do mesmo que, por sua parte, está associada com a aderência entre o agregado e a pasta cimentícia.

Carasek et al. (2018) também constataram que a absorção de água dos agregados aumenta, à medida que o teor de finos se eleva, explicando que esse aumento se deve à absorção física da água em torno dos grãos e nos poros presentes.

5.2 Produção das argamassas

Com os devidos materiais quantificados, foram produzidas argamassas para compor os corpos de prova com as respectivas porcentagens de resíduo de vermiculita em sua composição (0%, 10%, 30%, 50%). Como foi possível observar, devido às características físicas do resíduo consorciado com a areia artificial, a quantidade de água variou à medida que as porcentagens de substituição se elevavam.

Diante disso, não utilizando nenhum tipo de aditivo, a fim de analisar o comportamento do resíduo de vermiculita na mistura, a consistência da argamassa foi definida visualmente, por meio do movimento da colher de pedreiro (Figura 22) associado à quantidade de água no processo de amassamento (a partir do fator água/aglomerante definido para a argamassa testemunha, as demais foram adaptadas, sendo acrescentado gradualmente 0,5 em 0,5 ml, até a chegada da mesma consistência),

resultando em uma argamassa firme (devido às características granulométricas dos agregados já estudados), porém maleável e que não excedeu o volume de água posto.

Figura 22: Consistência da argamassa



Essa característica de consistência foi considerada para todas as argamassas, aumentando a quantificação de água, em decorrência do acréscimo do resíduo de vermiculita na mistura.

5.2.1 Influência do resíduo de vermiculita nos corpos de prova

O resíduo de vermiculita é um material leve (quando comparado a areia artificial), devido a sua granulometria muito fina, logo tende a auxiliar na promoção de uma argamassa que apresente essa característica, quando incorporado.

Tal fato foi constatado nessa pesquisa quando a proporção de substituição da areia artificial por resíduo de vermiculita foi elevado, podendo visualizar a diferença do peso dos corpos de prova, ao serem comparados aos que não possuem o resíduo em sua composição (Tabela 12).

Tabela 12: Média do peso (g) dos corpos de prova em relação ao aumento de incorporação do resíduo de vermiculita.

Média do peso (g) dos corpos de prova				
Tempo de cura (dias)	0%	10%	30%	50%
<i>7 ° dia de cura</i>	371,90	368,59	355,86	341,04
<i>14° dia de cura</i>	388,77	370,82	352,97	340,25
<i>21° dia de cura</i>	391,83	369,71	347,22	330,93

Os valores expressos foram adquiridos por meio da média dos exemplares de cada porcentagem, nos diferentes tempos de cura, após secagem na estufa a 105° C por 24h, adquirindo, assim, o peso seco.

Além desses valores encontrados, evidencia-se a diferenciação entre os pesos dos corpos de prova, ao comparar a argamassa testemunha entre as demais que possuem resíduo em sua composição com relação aos tempos de curas, obtendo-se para 0% - 10%, 0% - 30%, 0% - 50% aos 7 dias, um diferencial de 3,31g, 16,04g e 30,86g; aos 14 dias, 17,95g, 35,8g e 48,52g; aos 21 dias, 22,12g, 44,61g e 60,09, respectivamente.

Essa característica de leveza tende a gerar um material mais poroso devido à influência do teor de finos, além da forma e geometria dos grãos, conseqüentemente, surgirão particularidades provenientes dessa incorporação quando os corpos de prova forem submetidos aos ensaios no estado endurecido. Fato esse que será apresentado e discutido a seguir.

5.3 Avaliação das argamassas no estado endurecido

5.3.1 Resistência à Compressão

Dentre as propriedades mecânicas existentes, a resistência à compressão possui papel primordial na avaliação de argamassas no estado endurecido, visto que se apresenta como um estado de consolidação interna que suporta esforços, evidenciando sua funcionalidade na durabilidade da argamassa.

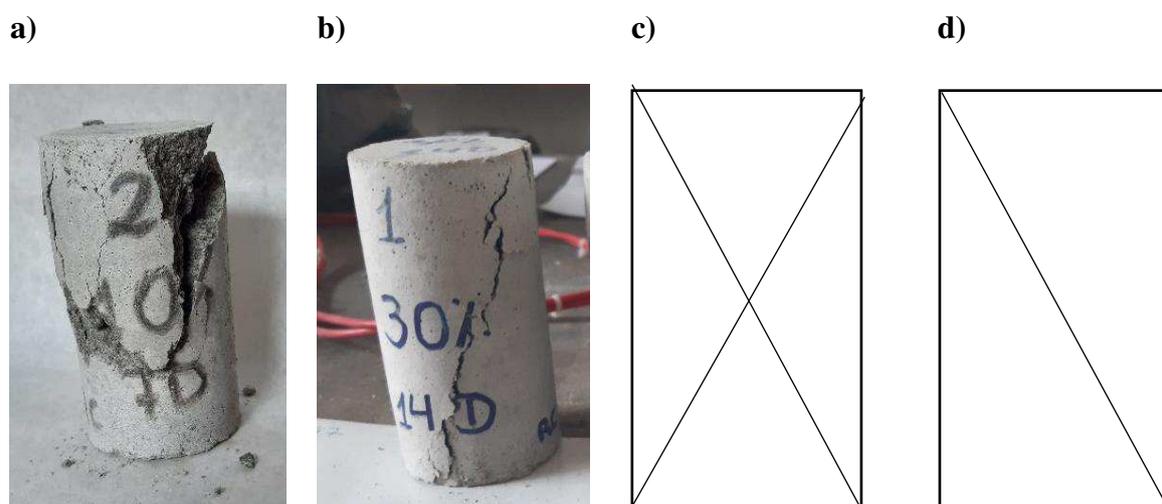
Para análise inicial, a forma como o corpo de prova cilíndrico se rompe deve ser considerado, podendo ser um primeiro indício de que o corpo de prova apresentará, ou não, desempenho favorável quanto ao ensaio realizado.

Rezende (2016) afirma que existem algumas particularidades quanto a esse quesito, defendendo que um corpo de prova bem estruturado apresentará alta confiabilidade no ensaio, suportando devidamente as cargas que são distribuídas ao longo de sua superfície. O mesmo autor defende algumas formas de rompimento. Duas formas principais de rompimento se mostraram corriqueiras no decorrer do ensaio, em conjunto com os tempos de curas, desse trabalho.

Como pode ser visto na Figura 23, os dois exemplares (Figura 23a e Figura 23b) correspondem à forma de “Tipo A - Cônica” (Figura 23c) e à forma “Tipo E – Cisalhada” (Figura 23d) denominadas conforme a NBR NM 5739 (ABNT, 2018), respectivamente.

Rezende (2016) descreve que a ruptura em forma de “Tipo A- Cônica” se mostra expressivamente adequada, demonstrando que todas as cargas foram distribuídas uniformemente em todo o corpo de prova, já a forma “Tipo E - Cisalhada” é o segundo tipo mais apropriado, em que o cisalhamento ocorre em planos inclinados em relação à direção da força cortante que o gera, sendo ambos considerados aceitáveis e confiáveis.

Diante disto, os formatos de rompimento frequentes neste trabalho demonstram confiabilidade dos corpos de provas em estudo, com a devida ruptura e desempenho favorável quanto ao ensaio.

Figura 23: Formas de ruptura do corpo de prova

Fonte: Ruptura dos corpos de prova (a), (b). Forma Tipo A - Cônica (c) e a forma Tipo E – Cisalhada (d), NBR NM 5739 (ABNT, 2018).

Os resultados obtidos no ensaio foram submetidos à análise de variância, no intuito de comparar a influência dos fatores controláveis sobre a resistência à compressão (Tabela 13).

Tabela 13: Análise de variância do efeito dos tratamentos e o tempo de cura sobre a resistência à compressão uniaxial

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	3	313,82424	104,60808	245,0029**
Tempo de cura	2	114,16038	57,08019	133,6877**
Interação: Tratamentos x Tempos de cura	6	29,90317	4,98386	11,6727**

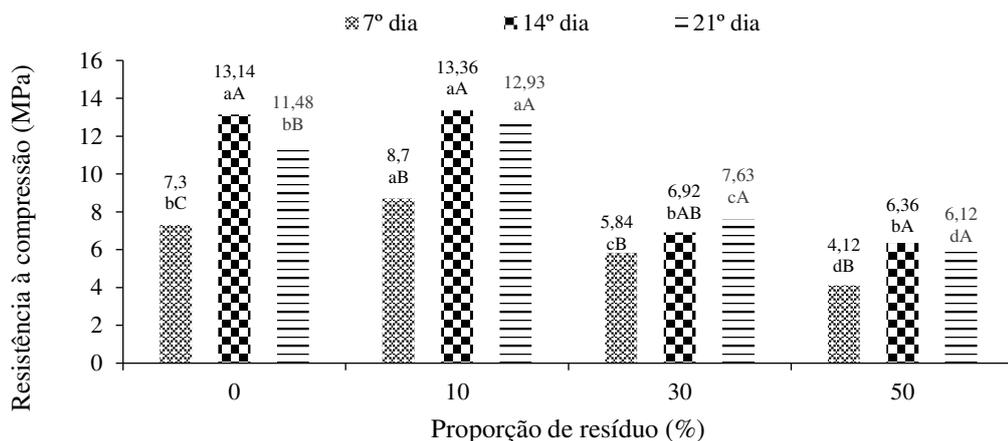
Notas: GL – Grau de liberdade; SQ – Soma dos quadrados; QM – Média quadrada; F – Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos.
 ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)
 * significativo ao nível de 5% de probabilidade ($0,01 = < p < 0,05$)

A análise de variância resultou no fato de que os efeitos do tratamento e do tempo de cura (analisados individualmente) são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 99%, já que o $p < 0,01$.

Com isso, cada uma dessas variáveis individuais exerce influência na resistência à compressão, assim como a interação entre elas.

Foram comparados seus resultados, de acordo com a quantidade de resíduo empregado ao substituir o agregado miúdo, obtendo o valor mais expressivo de resistência entre as proporções estudadas nos diferentes tempos de cura, conforme pode ser observado na Figura 24, que traz uma representação detalhada dos valores obtidos via ensaio.

Figura 24: Resistência à compressão (MPa) aos 7, 14 e 21 dias



Médias seguidas de mesma letra minúscula e maiúscula não diferem estatisticamente entre si (ASSISTAT, 2016).

As médias resultantes do ensaio são classificadas por meio de letras minúsculas e maiúsculas, referente à interação entre os tempos de cura e os tratamentos, respectivamente.

Analisando os resultados expostos graficamente na Figura 24, observa-se que, no primeiro tempo de cura (7 dias), o maior valor de resistência obtido foi para argamassa cuja proporção foi de 10% de resíduo de vermiculita empregado em substituição da areia artificial (8,7 MPa), que se elevou no tempo de 14 dias (13,36

MPa) e, estatisticamente, continuou apresentando melhor resultado entre as demais proporções, sem diferir sua capacidade de resistência, aos 21 dias (12,93MPa).

As finas partículas do resíduo podem ter preenchido espaços da zona de transição, reduzindo o espaço livre para a água nessa região (SOARES, 2014). Essa influência resultou em uma melhor ligação entre todos os elementos da mistura em até 10% da incorporação do resíduo, havendo proveito na coesão entre agregado e pasta, conferindo uma resistência maior, em comparação com as demais argamassas que possuem uma quantidade maior de resíduo incorporado, reduzindo significativamente a resistência, resultado esse já esperado.

A igualdade estatística das misturas expressa entre os 14 e 21 dias de cura tende a ser favorável em obras, visto que o tempo de cura da argamassa, para uma mesma resistência, diminui, fazendo com que se tenha uma contenção de gastos de materiais e de período de trabalho.

O ganho de resistência das argamassas, à medida que o tempo passa, também é observado para a proporção de 0% até 14 dias, bem como na proporção de 30%, nos três tempos de cura, e na de 50% até 14 dias. Esse fenômeno tende a ocorrer devido ao aumento do teor de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), produzido ao longo do tempo, pela reação de hidratação do cimento Portland, conferindo o ganho de resistência (METHA E MONTEIRO, 1994).

Resultados semelhantes foram encontrados por Vinco et al. (2017) e Dias (2018), que observaram esse ganho de resistência, com o passar no tempo, em suas pesquisas, ao substituir a areia natural por vermiculita expandida, avaliando aos 7 e 28 dias; e na substituição da areia natural por resíduo de vermiculita aos 7, 21 e 28 dias, respectivamente, havendo variações de acordo com a proporção de substituição empregada.

Ao comparar a argamassa de referência 0% (13,14 MPa) e a de 10% (13,36 MPa) aos 14 dias, nota-se semelhanças estatisticamente desempenhadas entre as mesmas, em suportar as cargas às quais foram submetidas.

Apesar de ter sido fixado visualmente, a trabalhabilidade e consistência das argamassas, o aumento da quantidade de água inserida, a partir da elevação da proporção do resíduo de vermiculita na mistura, bem como a geometria e forma lamelar

dos seus grãos, proporcionou diferenças significativas nos resultados médios da resistência, sendo observado especificamente nas proporções de 30% e 50%.

Couto et al. (2018) justificam que a presença do excesso de materiais finos na mistura pode provocar uma gradual migração da água de amassamento desse compósito para a superfície das partículas, tanto do resíduo como do pó de pedra, prejudicando a continuidade da hidratação do cimento utilizado. Tal problemática acaba também favorecendo o surgimento demasiado de poros permeáveis, contribuindo para uma compactação ineficiente da mistura em estado fresco; além disso, a presença do pó aderido a essas partículas provavelmente prejudicou a aderência na interação pasta-agregado, afetando a resistência mecânica da argamassa.

De forma geral, em relação aos resultados da análise estatística, a proporção de 10% apresenta-se como o melhor valor a ser utilizado em termos de resistência, pois essa quantidade específica de resíduo de vermiculita incorporado à mistura tende a suprir a necessidade de absorver cargas às quais forem submetidas, mesmo que aos 14 dias apresente igualdade estatística com a argamassa de referência (0%). Além disso, evidencia-se que tal porcentagem incorporada do resíduo promoveu quase o dobro de resistência em relação às demais. Os valores obtidos para as concentrações de 30% e 50% também possuem sua importância, apresentando resistência suficiente a uma diversidade de aplicações.

O emprego do resíduo tem justamente a função de busca pela redução da exploração dos agregados naturais, conjuntamente dando destino a materiais alternativos que são dispostos no meio ambiente e que podem provocar malefícios à região circundante. Diante disso, o uso conjunto do resíduo de vermiculita com a areia artificial agrega de modo sustentável o desempenho adquirido de forma eficiente, quando comparado a uma argamassa convencional (uso da areia natural).

Tal observação pode ser confirmada, ao comparar valores deste mesmo ensaio em um estudo realizado por Dias (2018), ao utilizar o resíduo de vermiculita em substituição parcial à areia natural, cujo valor de resistência encontrado aos 21 dias, pode ser considerado como semelhante, em relação a sua melhor proporção de incorporação de resíduo (60% - 13 MPa) e a argamassa de referência (0% - 12,12 MPa), quando comparado ao resultado identificado nessa pesquisa, no nível da melhor proporção encontrada (10% - 12,93 MPa).

Posteriormente ao ensaio de resistência à compressão, foi avaliada sua eficiência, por meio dos cálculos e métodos descritos anteriormente no item “Resistência à compressão”, encontrado no Material e Métodos do presente trabalho. Os resultados podem ser observados abaixo, na Tabela 14:

Tabela 14: Eficiência do ensaio de resistência à compressão.

	7 dias	14 dias	21 dias
TRATAMENTOS	Coeficiente de Variação → Desempenho	Coeficiente de Variação → Desempenho	Coeficiente de Variação → Desempenho
0%	<u>1,91</u> → <u>Excelente</u>	<u>0,92</u> → <u>Excelente</u>	<u>3,13</u> → <u>Muito Bom</u>
10%	<u>0,92</u> → <u>Excelente</u>	<u>1,72</u> → <u>Excelente</u>	<u>0,85</u> → <u>Excelente</u>
30%	<u>0,11</u> → <u>Excelente</u>	<u>0,58</u> → <u>Excelente</u>	<u>1,70</u> → <u>Excelente</u>
50%	<u>2,91</u> → <u>Excelente</u>	<u>2,04</u> → <u>Excelente</u>	<u>1,96</u> → <u>Excelente</u>

Como observado, todo o procedimento de execução do ensaio de resistência à compressão, quanto a sua dispersão em função das operações realizadas, apresentou-se favoravelmente ao Nível 1 (Excelente) e Nível 2 (Muito bom), sendo este último diferenciado dos demais, devido à variabilidade dos corpos de prova, ainda assim, considerado adequado, como esperado, dando confiabilidade aos resultados aqui apresentados.

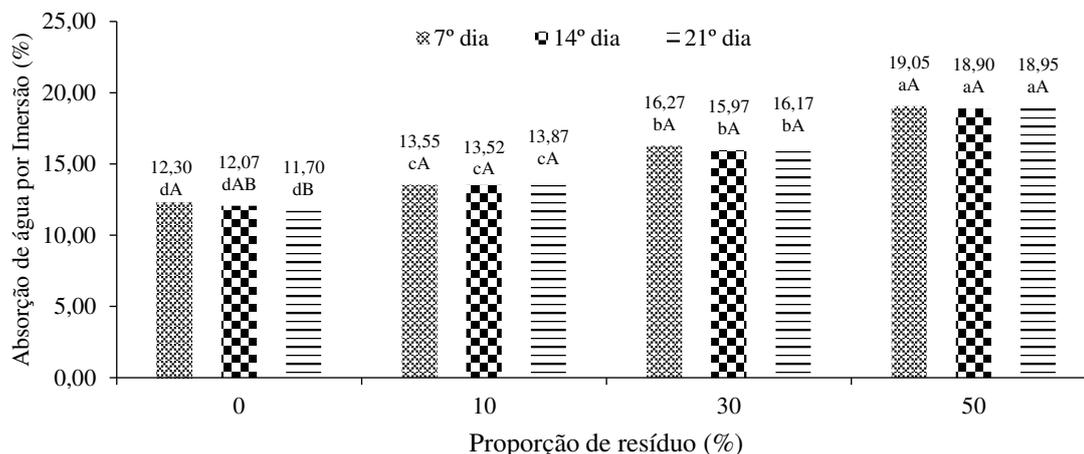
5.3.2 Absorção por imersão

Para a garantia de uma argamassa durável, outro fator interessante e necessário a ser avaliado é a sua capacidade de absorção de água. A água tende a transportar substâncias que podem causar danos ao material, o que pode interferir em sua resistência e durabilidade, caso não seja propósito possuir um material integralmente permeável.

Ao adicionar resíduos à produção de materiais de construção alternativos, o índice de absorção tende a aumentar, dependendo de suas características. Resultados

que comprovam essa afirmativa podem ser observados nessa pesquisa, conforme análise estatística demonstrada graficamente (Figura 25).

Figura 25: Ensaio de absorção por imersão



Médias seguidas de mesma letra minúscula e maiúscula, não diferem estatisticamente entre si (ASSISTAT, 2016).

As médias resultantes do ensaio são classificadas por meio de letras minúsculas e maiúsculas, referente à interação entre os tempos de cura e os tratamentos, respectivamente.

A argamassa que menos apresentou absorção foi a de 0% aos 21 dias (11,70%), possuindo uma matriz menos porosa, devido à ausência do resíduo de vermiculita, não apresentando similaridade estatística entre os demais tempos de cura dessa proporção, fato inverso encontrado nas outras substituições, que apresentaram igualdade estatística entre os três tempos de cura.

Sendo a vermiculita um argilomineral e, conseqüentemente, seu resíduo também apresentar essa característica, a capacidade de absorção tende a ser mais elevada quando a mesma estiver presente.

Realizando uma média entre os três tempos de cura de cada proporção e, comparando-as com o aumento de absorção apresentado no gráfico, observa-se um acréscimo de aproximadamente 1,63% entre as argamassas 0% -- 10%; ao aumentar o

resíduo em 30%, tem-se uma elevação de 4,12% de absorção em relação à argamassa 0%; e, por fim, a argamassa contendo 50% do resíduo apresentou uma absorção de 6,95% a mais, quando comparada à argamassa 0%.

Ao acrescentar o resíduo de vermiculita à mistura, observa-se um aumento gradativo de absorção, à medida em que vai se elevando quantidade de resíduo incorporado. Fato também encontrado com Dias (2018) que, ao substituir 100% do resíduo de vermiculita na argamassa, encontrou um acréscimo expressivo nos diferentes dias de curas (12,96%; 12,67%; 12,29% – para 7, 21 e 28 dias, respectivamente), em relação às demais argamassas que possuem outras quantidades do resíduo.

A prevalência da maior absorção por imersão foi constatada na argamassa com proporção de 50% de resíduo de vermiculita, devido a seu alto valor de substituição que permaneceu elevado nos três tempos de curas, apresentando semelhança estatística.

Para tal caso, Carasek et al. (2018) confirmam essa observação, afirmando que o aumento de absorção ocorreu, à medida que elevou o teor de finos, que pode ser explicado pelo aumento da superfície específica do material. Essa circunstância propicia maior superfície para adsorção física das moléculas de água, além do que, favorece a adsorção de um volume maior dessas moléculas por mecanismos de atração eletrostática, seja ao redor das partículas, seja nas paredes internas dos poros dos grãos maiores, evidenciando assim, a capacidade que um material com características argilosas possui, no que se refere à absorção.

Com o aumento da proporção do resíduo e à conseqüente elevação da relação água/aglomerante para manter o índice de consistência, o possível desprendimento do material fino aderido às partículas do agregado + resíduo não foi capaz de compensar o aumento da porosidade, nesse caso (COUTO et al., 2018).

Esses aumentos expressivos de absorção se interligam diretamente com a resistência à compressão avaliada anteriormente, visto que esse aumento é inversamente proporcional à capacidade de resistência, ou seja, quanto mais alto o teor de resíduo (influência de sua granulometria e seu formato lamelar), maior absorção da argamassa e menor é sua aptidão em resistir a esforços. Porém, ao analisar conjuntamente os dois testes até agora estudados, nota-se que a argamassa contendo 10% de resíduo de vermiculita, apresentou maior absorção em relação à argamassa de referência (0%), mas

não afetou bruscamente sua resistência à compressão, já que esta apresenta os melhores valores de suporte a cargas, em relação aos demais.

Afirma-se que o resíduo de vermiculita auxilia em uma maior absorção até certo nível de incorporação, sem que afete bruscamente sua capacidade de resistência, corroborando com Andrade e Guimarães (2017) que afirmam que o incremento do resíduo (dependendo do tipo), até certo limite, aumenta o grau de empacotamento das partículas, diminuindo a porosidade das argamassas e aumentando sua estanqueidade.

Sendo assim, para maior nível de absorção, a argamassa contendo 50% de resíduo é a melhor opção. No entanto, para o objetivo de se obter uma argamassa que possua certo equilíbrio entre a absorção e a capacidade de resistir a cargas, a argamassa de 10% de resíduo de vermiculita apresenta-se como uma alternativa plausível.

5.3.3 Absorção por capilaridade

Esse tipo absorção se dá por meio do contato de uma das faces do corpo de prova em contato com água, que é absorvida verticalmente através de seus poros capilares. Andrade e Guimarães (2017) afirmam que tal fenômeno de absorção depende da viscosidade, densidade e tensão superficial do líquido e acontece em estruturas porosas devido à força de atração dos poros sobre os líquidos que estão em contato com a superfície.

Tal absorção possui influência direta nas argamassas. Assim como a absorção por imersão, ela age também diretamente em sua resistência. Neste caso, na resistência de aderência e ao cisalhamento entre a argamassa e o substrato no qual é aplicada (ARAÚJO JR., 2004, apud ANDRADE e GUIMARÃES, 2017).

Depois de executado o ensaio, os resultados obtidos passaram por uma análise de variância, no intuito de comparar a influência dos fatores controláveis em sua capacidade de absorção (Tabela 15).

Tabela 15: Análise de variância do efeito dos tratamentos e o tempo de cura sobre a absorção por capilaridade.

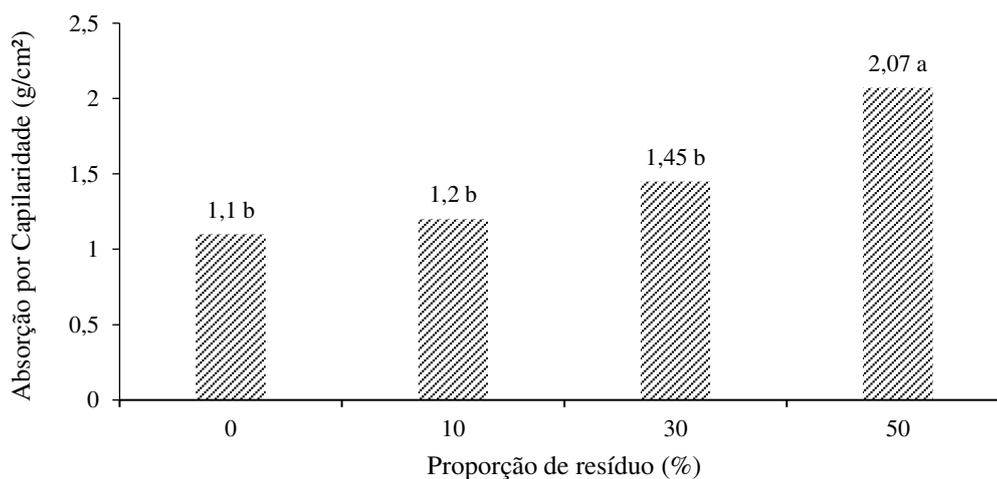
Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	3	6,78687	2,26229	22,5139**
Tempo de cura	2	2,45550	1,22775	12,2184**
Interação: Tratamentos x Tempos de cura	6	0,27680	0,04613	0,4591 ^{ns}

Notas: GL – Grau de liberdade; SQ – Soma dos quadrados; QM – Quadrado médio; F – Parâmetro de Fisher para o teste de significância dos efeitos.
 ** significativo ao nível de 1% de probabilidade ($p < 0,01$)
^{ns} não significativo ($p > 0,05$)

Como constatado, os efeitos do tratamento e do tempo de cura (analisados individualmente) são estatisticamente significativos a um nível de confiança de 99%, já que $p < 0,01$, o que não acabou não sendo obtido na interação entre eles.

Com isso, cada uma dessas variáveis, exerce influência na absorção por capilaridade e, diante disso, serão analisadas individualmente, conforme Figura 26 e Figura 27.

Figura 26: Efeitos da quantidade de resíduo sobre a absorção por capilaridade



Médias seguidas de mesma letra, não diferem estatisticamente entre si (ASSISTAT, 2016).

As médias resultantes do ensaio são classificadas por meio de letras, cuja significância estatística é constatada em ordem crescente das letras postas. Especificamente nesse ensaio, cada fator é analisado individualmente, sendo esse primeiro gráfico, relativo ao efeito que a quantidade do resíduo influi na absorção via capilar da argamassa.

Observa-se na Figura 26 acima, que a absorção de água por capilaridade é diretamente proporcional ao aumento do resíduo de vermiculita contido na argamassa, sendo assim, a maior absorção no nível de 50% de substituição da areia artificial pelo resíduo, resultados que se assemelham aos encontrados pelo ensaio de absorção por imersão.

Segundo Cunha et al. (2018), esse aumento do coeficiente de absorção por capilaridade, encontra-se relacionado com a presença de uma razão água/ligante superior, devido à elevada quantidade de finos presentes na mistura, de forma a se obter uma argamassa com boa trabalhabilidade.

Essa presença de água em excesso tende a não ser utilizada no processo de hidratação do cimento, evaporando-se e provocando a formação prematura de poros capilares, contribuindo assim, para a elevação da capacidade de absorção desses poros. Esse tipo de comportamento é comum em argamassas que possuem resíduos em sua composição.

Dependendo da finalidade para a qual se aplica a argamassa, essa particularidade pode ser benéfica, quando se pensa em um produto permeável e de melhor drenagem da umidade em seu interior, e pode ser maléfica, quando se deseja obter um produto de melhor resistência. Aguiar (2017) afirma que altos valores de coeficiente de capilaridade indicam perdas, em termos de durabilidade, impermeabilidade e nas propriedades mecânicas da argamassa. Já Maciel, Barros e Sabbatini (1998) destacam a necessidade de uma estabilidade, indicam que, apesar de ser importante que a argamassa seja estanque, é recomendável que seja permeável ao vapor de água para favorecer a secagem de umidade de infiltração (água da chuva, por exemplo) ou decorrente da ação direta do vapor de água.

Também se observou a igualdade estatística entre a argamassa 0%, 10% e 30%, não havendo divergência da argamassa com e sem resíduo, resultando em uma menor absorção, conseqüentemente, subentende-se a redução da formação demasiada de poros

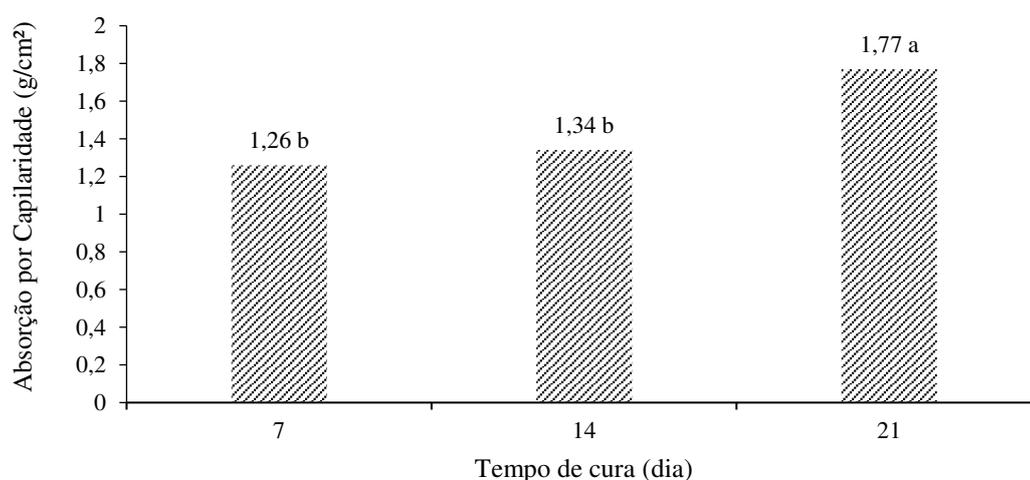
capilares na argamassa, o que foi inversamente proporcional, quando se elevou a quantidade de incorporação do resíduo de vermiculita na argamassa, no caso, a de proporção 50%, como já descrito.

Em estudo realizado por Aguiar (2017), foi observado que, no acréscimo da incorporação de vermiculita na argamassa, para traço de até 25%, houve uma diminuição no coeficiente de sua capilaridade, assemelhando-se aos resultados encontrados nessa pesquisa, nas incorporações de 10% e 30% do resíduo oriundo do mesmo material em questão. Tal comportamento indica que a incorporação tanto da vermiculita, como também de seu resíduo em baixas proporções, pode não influenciar de forma significativa a absorção por capilaridade da argamassa.

Evidencia-se que, quanto menor a absorção capilar, maior estanqueidade da argamassa, promovendo, assim, maior proteção a agentes agressivos (substâncias impuras que podem ser levados pela água para o interior da argamassa), fazendo com que ela apresente uma melhor propriedade mecânica.

Dando sequência à discussão dos dados obtidos na análise de variância, a segunda variável observada corresponde ao tempo de cura e é demonstrada graficamente na Figura 27 abaixo:

Figura 27: Efeitos do tempo de cura sobre a absorção por capilaridade



Médias seguidas de mesma letra, não diferem estatisticamente entre si (ASSISTAT, 2016).

As médias resultantes do ensaio são classificadas por meio de letras, cuja significância estatística é constatada em ordem crescente das letras postas. Especificamente nesse ensaio, cada fator é analisado individualmente, sendo esse segundo gráfico relativo ao efeito dos tempos de cura, na absorção via capilar da argamassa.

Como é observado, o comportamento dos níveis de absorção, com o passar do tempo, são diretamente proporcionais ao acréscimo da quantidade do resíduo de vermiculita, apresentando maior desempenho de absorção aos 21 dias e igualdade estatística aos 7 e 14 dias para todas as substituições.

Tanto a absorção por imersão quanto a absorção por capilaridade tendem a apresentar influência direta e decisiva quanto à resistência que apresenta uma queda gradativa quando a absorção de água aumenta, mostrando a relação inversa entre essas propriedades e indicando um excesso de finos provocado pelo resíduo na mistura, que não contribui mais para a melhoria do empacotamento físico dos grãos, por meio do preenchimento dos poros intersticiais, que resultaria em aumento da compacidade (SAVAZZINI-REIS et al., 2019).

É notório o quanto os dois tipos de absorção (via capilar e via imersão) apresentam-se seguindo um mesmo padrão e ritmo de crescimento, seja por meio da quantidade de resíduo incorporado, seja pelo tempo de cura ao qual as argamassas foram expostas, tendendo assim, a uma percepção de influência direta com a relação água/aglomerante, ou seja, quanto maior essa relação, maior a capacidade de absorção da argamassa.

Tal observação também foi constatada por Medeiros-Junior, Munhoz e Medeiros (2019), conciliando o aumento da relação água/cimento com o aumento da porosidade dos corpos de prova, afirmando assim, que ambas as medidas de absorção estão diretamente relacionadas e uma alta dependência pode ser identificada entre elas, consolidando a influência de ambas as propriedades na absorção e percolação de água na microestrutura do material.

Diante disso, ressalta-se que, em preferência à argamassa que desempenhe maior absorção, evidencia-se a que possui 50% de resíduo de vermiculita em sua composição. E em defesa de uma argamassa devidamente sustentável e que apresenta um equilíbrio na relação absorção – resistência, a argamassa contendo 10% de resíduo de vermiculita,

mostra-se em relevância, apresentando uma absorção geral (via capilar e imersão) que não afeta significativamente a sua capacidade mecânica de resistir a cargas.

5.4 Protótipo do Ladrilho hidráulico

A argamassa que apresentou melhor desempenho nos ensaios mecânicos realizados foi a de proporção 10% de resíduo de vermiculita e, por essa razão foi aplicada na produção do protótipo do ladrilho.

A argamassa, ao ser reproduzida, foi posta ao preenchimento do molde plástico em camada única. No intuito de espalhar e promover melhor adensamento, o molde foi submetido a movimentos de vibração manualmente, eliminando assim, a presença de ar na argamassa.

Com a moldagem, a presença de bolhas de ar se fez presente na face interna do ladrilho (Figura 28), porém, após o período de firmeza da placa em 24h, a aparência ficou devidamente uniforme (Figura 29) e com as dimensões apropriadas.

Figura 28: Presença de bolhas de ar na placa



Figura 29: Aparência final da placa



A formulação do protótipo do ladrilho hidráulico foi realizada com o intuito de possibilidade de uso dessa argamassa sustentável alcançada, com uso viável de até 10% do resíduo de vermiculita, em substituição parcial da areia artificial, para compor um revestimento de piso.

Após desmoldagem, as peças passaram por análise visual, verificando a conformidade com seus moldes, bem como a uniformidade do acabamento superficial (face interna e externa) e a qualidade da moldagem, sem “furos” presentes, provenientes das bolhas de ar, no momento de preenchimento do molde (Figura 30), sem a presença de falhas, nem resquício de argamassa na fôrma pós desmolde.

Figura 30: Face externa e lateral do ladrilho



As peças, coincidindo com seus moldes, apresentaram-se com acabamento superficial satisfatório e sem variações dimensionais indesejáveis.

6. CONCLUSÃO

Após a análise dos resultados do procedimento experimental, pode-se concluir que:

Devido ao maior índice de finos presentes no resíduo de vermiculita, bem como seu formato lamelar e sua característica de argilomineral, os parâmetros de massa específica e absorção estudados foram maiores que os obtidos na análise da areia artificial.

A substituição parcial da areia artificial pelo resíduo de vermiculita, à medida que foi aumentando a proporção substituída, promoveu uma maior demanda por água para manter o mesmo índice de consistência em todas argamassas.

Quanto maior o teor de substituição da areia artificial por resíduo de vermiculita, menor a resistência mecânica e maior a capacidade de absorção (via imersão e via capilar). Os valores de resistência à compressão indicam que uma possível substituição de até 10% do volume de areia artificial por resíduo de vermiculita pode não afetar significativamente tal propriedade, resultado em um eficaz empacotamento dos grãos.

A argamassa contendo 10% de resíduo de vermiculita, quando comparada a argamassa de referência, apresentou uma maior absorção, tanto por capilaridade como por imersão, porém, não comprometeu a resistência mecânica. Tal característica foi inversamente proporcional para as outras argamassas, em que uma maior capacidade de absorção (imersão e capilar) foi observada na argamassa que contém 50% do resíduo de vermiculita, conseqüentemente, apresentando menor resistência em relação às demais.

O protótipo formulado apresentou uniformidade em seu aspecto visual, com acabamento superficial satisfatório e sem variações dimensionais indesejáveis, havendo a possibilidade de compor o piso de instalações agropecuárias, sugerindo-se que, para tal afirmação, trabalhos futuros sejam executados com a realização de ensaios específicos, avaliando os parâmetros necessários para sua aplicabilidade.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Fazendo-se capaz de compor um revestimento para pisos, indica-se a realização de ensaios aprofundados e específicos com relação aos ladrilhos hidráulicos.

A realização desses ensaios diretos envolvendo o ladrilho hidráulico visa o entendimento de fatores que não foram tratados como foco nesta pesquisa, como por exemplo:

- Influência do tempo de vibração e da forma como foi empregada na hora da moldagem do protótipo;
- Substituição parcial da água por agente plastificante;
- Comportamento mecânico (resistência à flexão, desgaste à abrasão, absorção);
- Uso real e atuante em determinada área com tráfego presente.

Ficando assim, sugestões para trabalhos futuros.

7. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9459: Ladrilho Hidráulico – Formatos e dimensões**. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 9458: Assentamento de ladrilho Hidráulico**. Rio de Janeiro, 1986.

_____. **NBR 7215: Cimento Portland – Resistência à compressão**. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 13818: Placas cerâmicas para revestimento – Especificação e métodos de ensaios**. Rio de Janeiro, 1997.

_____. **NBR NM 30: Agregado miúdo-Determinação da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR 248: Agregados-Determinação da composição granulométrica**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 52: Agregado miúdo-Determinação da massa específica e massa específica aparente**. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto**. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13278: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes de placas cerâmicas – Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado**. Rio de Janeiro, 2005d.

_____. **NBR NM 45: Agregados-Determinação da massa unitária e do volume de vazios**. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecido - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 9779: Argamassa e concreto endurecido** - Determinação da absorção de água por capilaridade. Rio de Janeiro, 2012.

_____. **NBR 9457: Ladrilhos hidráulicos para pavimentação** – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2013.

_____. **NBR 5739: Ensaios de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, 2018.

AGUIAR, A. L. D. de. **Estudo das propriedades tecnológicas da argamassa de revestimento com incorporação da vermiculita expandida**. 20f. Monografia (graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal – Rio Grande do Norte, 2017.

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**. v.2, n.2, p. 25-36, 2015.

ANDRADE, E. S.; GUIMARÃES, C. C. Propriedades de argamassas com EVA (*Ethylene vinyl acetate*) em substituição parcial ao agregado. **REEC - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, vol. 13, nº 1, p. 174-192, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO – ABCP. **Manual de ladrilho hidráulico**: Passeio Público. 28p. São Paulo – SP, 2010.

BREITENBACH, S. B.; SANTOS, O. C.; ANDRADE, J. C. S.; NASCIMENTO, R. M.; MARTINELLI, A. E. Adição de resíduo do polimento de porcelanato em argamassas de restauro à base de cal. **Revista Cerâmica**, vol. 63, nº 367, p. 395-401, 2017.

CAMPOS, H. F. **Concreto de alta resistência utilizando pó de pedra como substituição parcial do cimento Portland**: estudo experimental. 148f. Dissertação

(mestrado em Engenharia de Construção Civil) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba – Paraná. 2015.

CANEDO, A. C.; BRANDÃO, F. B.; PEIXOTO FILHO, F. L. **Reaproveitamento de resíduo de construção na produção de argamassa de revestimento**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil – Universidade Federal de Goiás. Goiânia – Goiás, 2011.

CARASEK, H. Argamassas. In. ISAIA, Geraldo Cechella. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, p. 893-941, 2010.

CARASEK, H.; ARAÚJO, R. C.; CASCUDO, O.; ANGELIM, R. Parâmetros da areia que influenciam a consistência e a densidade de massa das argamassas de revestimento. **Revista Matéria**, v.21, n.3, p. 714 –732, 2016.

CARASEK, H.; GIRARDI, A. C. C.; ARAÚJO, R. C.; ANGLEIM, R.; CASCUDO, O. Estudo e avaliação de agregados reciclados de resíduo de construção e demolição para argamassas de assentamento e de revestimento. **Cerâmica**, vol. 64, nº 370, p. 288-300, 2018.

COUTO, A. F.; SCHWANTES-CEZARIO, N.; MORALES G.; TORALLES, B. M. Efeitos da substituição parcial do agregado miúdo por cinza de madeira de eucalipto nas propriedades das argamassas. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 5, n. 2, p. 84-98, 2018.

CUNHA, S.; AGUIAR, J.; FERREIRA, V.; TADEU, A. Classificação de argamassas com incorporação de materiais de mudança de fase com base nas suas propriedades físicas, mecânicas e térmicas. **Revista Matéria**, v.23, n.3, e-12207, 2018.

DALLAGNOL, G. H. **Estudo sobre as características nos estados fresco e endurecido de uma argamassa para revestimentos estabilizada por 72 horas variando o tempo de aplicação a partir de sua mistura na central dosadora**. 139f.

Monografia (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade de Caxias do Sul, Bento Gonçalves – Rio Grande do Sul, 2018.

DALLE, P. **Ladrilhos Hidráulicos. Ladrilhos antiderrapantes.** 2021. Disponível em < <http://www.dallepiagge.com.br/fotos-anti-derrapantes.php> > , acesso em 10/03/2021.

DESTEFANI, A. Z. **Desenvolvimento de ladrilho hidráulico piso tátil pelo processo de vibração usando resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais.** Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes– Rio de Janeiro, 2013.

DIAS, R. T. V. **Desempenho termomecânico de argamassas com adição de resíduos de vermiculita para construções rurais.** 83f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – Paraíba, 2018.

DIAS, R. T. V.; Araújo, S. N. R.; Meira, A. S.; Lopes Neto, J. P. **Resíduo de vermiculita na resistência à compressão em argamassas de revestimento.** *In: Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia. Maceió: CONTECC. 08/2018. p.5.*

DRUMOND, F. T. E.; FERREIRA, E. E.; CHAVES, M. B. D. S.; GONÇALVES, P. H. Aproveitamento de resíduos finos de rochas ornamentais na fabricação de ladrilho hidráulico piso tátil para a orientação de deficientes visuais. **Revista Engenharia de Interesse Social**, [S. l.], v. 1, n. 3, 2018.

FERREIRA, M. J. D. **Argilominerais puro e quimicamente modificados como adsorventes para corantes catiônicos.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa – Paraíba, 2009.

FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A.; COUTO, H. J. B.; GONÇALVES, C. C. **Vermiculita, mais que um mineral termo acústico.** *In: IV Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste.* João Pessoa: CETEM/MCT. 11p., 2016.

GUERRA, A. N. L. P. **Caracterização e utilização de rejeito de minério de ferro PELLET FEED em pavimentos de blocos intertravados de concreto.** 124f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte – Minas Gerais. 2014.

LOPES NETO, J. P. **Construções e Instalações Rurais.** Brasília – DF: NT editora, 2017.

MACIEL, L. L.; BARROS, M. M. S. B.; SABBATINI, F. H. **Recomendações para a execução de revestimentos de argamassa para paredes de vedação internas e exteriores e tetos.** São Paulo, 1998.

MARQUES, M. L; CAMPOS, K. A. Estudo da adição do pó de pedra em argamassas de revestimento e assentamento. **Revista Pindorama**, Ano 3, nº 3, p. 150-164, 2012.

MATOS, L. F. de; ALLEM, P. M.; PIVA, J. H. **Avaliação da substituição do agregado miúdo natural (areia) pelo agregado miúdo de britagem (pó de pedra) quanto às características mecânicas do concreto.** UNESC- Universidade do Extremo Sul Catarinense. Santa Catarina, 2017.

MEDEIROS-JÚNIOR, R. A.; MUNHOZ, G. S.; MEDEIROS, M. H. F. Correlações entre absorção de água, resistividade elétrica e resistência à compressão de concreto com diferentes teores de pozolana. **Revista ALCONPAT**, vol.9, n. 2, pag. 152 – 166. 2019.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais.** São Paulo: Ibracon, 673 p., 2008.

MENDONZA-RANGEL, J. M.; FLORES-JARQUÍN, J. M.; DE LOS SANTOS, E. U.; GARCÉS, P. Durabilidade de argamassas de reparo sustentáveis expostas a ambiente industrial. **Revista ALCONPAT**, vol. 6, n 1, p. 41-51, 2016.

MENOSSE, R. T. **Utilização do pó de pedra basáltica em substituição à areia natural do concreto.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP. Ilha Solteira – São Paulo. 2004.

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P., LEITE, R. da S. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso. **Revista da Universidade Estadual de Feira de Santana - Sitientibus**, Feira de Santana, n.26, p.49-61, 2002.

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

NUNES, B. R. P. **Avaliação do uso da argila vermiculita como catalisador no processo de hidrólise do Bagaço de Cana-de-açúcar.** 2015. 139 f. (Tese de Doutorado). Centro de Ciências e Tecnologia, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - Paraíba - Brasil, 2015.

PAULA, R. de F. **Vermiculita.** Agência Nacional de Mineração. Goiás: ANM, 2018. Disponível em:<<https://www.gov.br/anm/ptbr/vermiculita>>. Acesso em: 10/06/2020.

PCZIECZEK, A. **Análise das propriedades físicas e mecânicas de argamassa para revestimento utilizando cinza volante e resíduos de borracha de pneus inservíveis.** 147 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Joinville – Santa Catarina, 2017.

PEC MAQ PEC FORMAS. **Ladrilhos.** São Paulo, SP. 2021. Disponível em <<https://www.pecformas.com.br/subcategoria/16>>. acesso em 10/06/2021.

RECENA, F. A. P. **Conhecendo argamassa.** 2 ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 188 p., 2012.

RESENDE, C. **A forma do rompimento do CP é importante? Concreto: propriedades, descobertas e casos interessantes.** 2016. Disponível em <<http://propriedadesdoconcreto.blogspot.com>>. Acesso em 10/04/2021.

RIBEIRO, K. F. A.; BRANCO, M. P. V.; VALIN JR, M. O.; ALMEIDA, E. S. **Estudo da substituição do agregado miúdo em argamassa.** *In: 4º Encontro em Engenharia de Edificações e Ambiental, Universidade Federal de Mato Grosso.* Cuiabá – Mato Grosso. 2016.

ROJAS-RAMIREZ, R. A.; MACIEL, M. H.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G.; COELHO, A. C. V. Impact of the use of vermiculite residue in the hardened properties of mortar. **Cerâmica.** São Paulo, vol. 65, n. 373, p. 107-116, 2019 .

SAVAZZANI-REIS, A.; ANDRADE, D. M.; FAGUNDES, A. F.; ANDRADE, R. G. M. de. **Utilização de resíduos em ladrilho hidráulico.** *In: 74º Congresso Anual da ABM – Internacional, parte integrante da ABM Week 2019.* São Paulo. 11p., 2019.

SAVAZZANI-REIS, A.; FAGUNDES, A. F. Incorporação de resíduo de madeira em ladrilho hidráulico vibrado. **Revista Tecnologia em Metalúrgica, Materiais e Mineração,** vol. 16 n. Especial, 2020.

SBRIGHI NETO, C. Agregados naturais, britados e artificiais para concreto. *In: PASSUELLO, Alexandra et al (Ed.). Concreto: Ciência e Tecnologia.* São Paulo: Geraldo C. Isaia, 2011. Cap. 7. p. 233-260, 2011.

SCHANKOSKI, R. A.; PRUDENCIO JR., L. R.; PILAR, R. **Influência do tipo de argamassa e suas propriedades do estado fresco nas propriedades mecânicas de alvenarias estruturais de blocos de concreto para edifícios altos.** *Matéria* (Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, vol. 20, n. 4, p. 1008-1023, 2015.

SHUTTER, G., POPPE, A. M. Quantification of the water demand of sand in mortar, **Construction and Building Materials,** v.18, p.517-521, 2004.

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

SILVA, F. de A. S.; AZEVEDO, C. A. V. de. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. **Afr. J. Agric. Res.**, vol.11, n.39, p.3733-374, 2016. DOI: 10.5897/AJAR2016.11522

SOARES, A. P. D. S.; MÁRMORE, I. A. P. **Estudo comparativo do desempenho térmico da argamassa convencional e com adição de vermiculita**. UCB. Brasília, p. 40. 2016.

SOARES, R. B. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com a incorporação de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais**. 163f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória – ES, 2014.

SOUSA, L. D. A. de. **Cinética de liberação do potássio em rejeito de mineração de vermiculita para o fortalecimento do solo**. 44 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mineral, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2012.

TOKARSKI, R. B.; MATOSKI, A.; CECHIN, L.; WEBER, A. M. Comportamento das argamassas de revestimento no estado fresco, compostas com areia de britagem de rocha calcária e areia natural. **Matéria (Rio de Janeiro)**, Rio de Janeiro, vol. 23, n. 3, e 12196, 2018.

UGARTE, J. F. D. O.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. Vermiculita. *In*: LUZ, A. B. D.; LINS, F. A. F. **Rochas & Minerais Industriais**: usos e especificações. 2 ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, Cap. 38, p. 677-698. 2008.

VIEIRA, E. G.; REZENDE, E. N. Exploração Mineral de Areia e um Meio Ambiente Ecologicamente Equilibrado: É possível conciliar? **Sustentabilidade em Debate** - Brasília, v. 6, n. 2, p. 171-192, 2015.

VINCO, L. G. F.; OLIVEIRA, J. D. de.; TRISTÃO, F. A.; VIEIRA, G. L. Viabilidade técnica e econômica de argamassas de revestimento produzidas com incorporação de resíduos de rochas ornamentais. **Ambiente Construído**, vol.17, n. 4, 165-182, 2017.