



GUSTAVO MONTEIRO COSTA SBAMPATO RESENDE

**DESEMPENHO DE TIJOLO MACIÇO DE SOLO-CIMENTO
COM INCORPORAÇÃO DE CONCENTRADO DE
VERMICULITA ESFOLIADA PARA ALVENARIA
ECOLÓGICA**

**LAVRAS - MG
2024**

GUSTAVO MONTEIRO COSTA SBAMPATO RESENDE

**DESEMPENHO DE TIJOLO MACIÇO DE SOLO-CIMENTO COM
INCORPORAÇÃO DE CONCENTRADO DE VERMICULITA ESFOLIADA PARA
ALVENARIA ECOLÓGICA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais - PPGBIOMAT, área de concentração compósitos e nanocompósitos lignocelulósicos, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Mario Guimarães Junior
Orientador

Prof. Dr. Rafael Farinassi Mendes
Coorientador

**LAVRAS - MG
2024**

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração de Ficha Catalográfica da Biblioteca
Universitária da UFLA, com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

Resende, Gustavo Monteiro Costa Sbampato.

Desempenho de tijolo maciço de solo-cimento com
incorporação de concentrado de Vermiculita esfoliada para
alvenaria ecológica / Gustavo Monteiro Costa Sbampato Resende. -
2024.

92 p. : il.

Orientador(a): Mario Guimaraes Junior.

Coorientador(a): Rafael Farinassi Mendes.

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de
Lavras, 2024.

Bibliografia.

1. Tijolo maciço de solo-cimento. 2. Vermiculita esfoliada. 3.
Isolamento térmico e acústico. I. Guimaraes Junior, Mario. II.
Mendes, Rafael Farinassi. III. Título.

GUSTAVO MONTEIRO COSTA SBAMPATO RESENDE

**DESEMPENHO DE TIJOLO MACIÇO DE SOLO-CIMENTO COM
INCORPORAÇÃO DE CONCENTRADO DE VERMICULITA ESFOLIADA PARA
ALVENARIA ECOLÓGICA**

**PERFORMANCE OF SOLID SOIL-CEMENT BRICK WITH INCORPORATION OF
EXFOLIATE VERMICULITE CONCENTRATE FOR ECOLOGICAL MASONRY**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais - PPGBIOMAT, área de concentração compósitos e nanocompósitos lignocelulósicos, como requisito para obtenção do título de Mestre.

Aprovado em: 28/02/2024

Dr. Alan Pereira Vilela – UNILAVRAS-MG

Dra. Marcela Maira Nascimento de Souza Soares – CEFET-MG

Dr. Mario Guimaraes Junior
Orientador

Dr. Rafael Farinassi Mendes
Coorientador

LAVRAS - MG

2024

A minha família, pilar fundamental em minha vida.
Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre me guiar e prover a disposição necessária para conquistar meus objetivos.

Aos meus queridos e amados pais, Cristiane e João Luiz, que sempre me proporcionaram as condições necessárias para que eu pudesse continuar aprimorando meus conhecimentos. A toda minha família, pelo apoio e carinho.

Agradeço a FAPEMIG, pela concessão da bolsa de estudos. À Universidade Federal de Lavras – UFLA, por fornecer os profissionais, os equipamentos e o espaço necessários para a realização desta pesquisa. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Biomateriais – PPGBIOMAT, pela oportunidade.

Ao meu orientador, professor Dr. Mario Guimarães Junior e ao professor Dr. Rafael Farinassi Mendes, pelo auxílio, compreensão, paciência e ensinamentos durante este período. Aos professores e técnicos, pelo aprendizado e suporte. Aos amigos e colegas, pelos conselhos e companheirismo. Um agradecimento especial ao técnico do Centro de Inovações em Materiais Sustentáveis Jose de Arimatéia Almeida, que me auxiliou no desenvolvimento prático da minha pesquisa, ao Diogo Antonio Correa Gomes, que me incentivou a ingressar no mestrado e ao João Vitor Rabelo Baccarini, por me fornecer moradia durante este período.

Agradeço a Central de Análises e Prospecção Química e ao Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural da Universidade Federal de Lavras pelo fornecimento dos equipamentos e suporte técnico para os experimentos envolvendo análises de infravermelho e microscopia eletrônica, respectivamente. O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais - FAPEMIG.

A empresa Brasil Minérios por fornecer o concentrado de Vermiculita, proveniente da mineração de fosfato.

Por fim, agradeço a todos que contribuíram, de forma direta ou indireta, para o desenvolvimento desta etapa em minha vida.

RESUMO

O desenvolvimento econômico de um país está diretamente relacionado ao setor da construção civil. Dentre os materiais mais utilizados, os blocos cerâmicos se destacam pelo fácil acesso e baixo custo, entretanto, sua produção não apresenta viés sustentável. Neste cenário, o tijolo maciço de solo-cimento (TMSC) apresenta-se como uma alternativa ecológica, bem como a incorporação de matérias-primas secundárias. Acerca disso, a proposta do trabalho foi incorporar concentrado de Vermiculita esfoliada (VE) em TMSC. Para isso, o concentrado de Vermiculita natural (VN) foi tratado termicamente a 800°C, em períodos de 10 min (VE 800/10) e 15 min (VE 800/15). Ambos VN e VE, foram caracterizados quanto as propriedades morfológica, física, química, microestrutural e térmica. Para o solo foram realizadas as caracterizações físicas, microestrutural, química e morfológica. Por fim, o TMSC foi caracterizado quanto as propriedades de absorção de água, resistência à compressão e isolamentos térmicos e acústico, antes e após o envelhecimento acelerado. O solo atendeu aos limites estabelecidos pela norma, não necessitando de correções. O VN foi classificado como material superfino e com um teor de 83,33 %. O tratamento térmico mais eficiente foi VE 800/15, com aumentos na área superficial específica e nos volumes e raios dos poros, sendo, portanto, utilizado na produção dos TMSC. Foram confeccionados três tratamentos, substituindo o solo, em volume, pelo VE 800/15; em 0, 2,5 e 5 %. Os resultados encontrados para a absorção de água atenderam aos limites estabelecidos pela NBR 8491 (ABNT, 2012), entretanto, as resistências à compressão foram inferiores aos mínimos estabelecidos pela norma. A barreira acústica aumentou significativamente no T3 após o envelhecimento, com um aumento de 19 %. Em relação a condutividade térmica, houve uma tendência de redução nos valores, de acordo com a incorporação do VE, nos tratamentos envelhecidos. Conclui-se que os TMSC com incorporação de VE não podem ser utilizados para este fim, devido aos resultados mecânicos não atenderem a norma, entretanto, todas as outras propriedades obtiveram melhorias, indicando um potencial de aplicação onde a resistência à compressão necessária seja inferior a 1 MPa.

Palavras-Chave: Esfoliação; Isolamento acústico e térmico; Porosidade; Tijolo maciço de solo-cimento; Vermiculita.

ABSTRACT

The economic development of a country is directly related to the construction sector. Among the most used materials, ceramic blocks stand out for their easy access and low cost, however, their production does not have a sustainable bias. In this scenario, the soil-cement solid brick (SCSB) presents itself as an ecological alternative, as well as the incorporation of secondary raw materials. In this context, the proposal of the work was to incorporate exfoliated Vermiculite concentrate (EV) in SCSB. For this, the natural Vermiculite concentrate (NV) was thermally treated at 800°C, for periods of 10 min (EV 800/10) and 15 min (EV 800/15). Both NV and EV were characterized regarding morphological, physical, chemical, microstructural and thermal properties. For the soil, physical, microstructural, chemical and morphological characterizations were performed. Finally, SCSB was characterized in terms of water absorption properties, compressive strength, and thermal and acoustic insulation, before and after accelerated aging. The soil met the limits established by the standard, not requiring corrections. NV was classified as superfine material with a content of 83.33 %. The most efficient thermal treatment was EV 800/15, with increases in specific surface area and pore volumes and radii, and therefore used in the production of SCSB. Three treatments were made, replacing the soil volume with EV 800/15; at 0, 2.5 and 5 %. The results for water absorption met the limits established by NBR 8491 (ABNT, 2012), however, compressive strengths were lower than the minimums established by the standard. The acoustic barrier significantly increased in T3 after aging, with a 19 % increase. In terms of thermal conductivity, there was a trend of reduction in values, according to the incorporation of EV, in the aged treatments. It is concluded that SCSB with EV incorporation cannot be used for this purpose, due to the mechanical results not meeting the standard, however, all other properties improved, indicating a potential application where the necessary compressive strength is less than 1 MPa.

Keywords: Exfoliation; Acoustic and thermal insulation; Porosity; Soil-cement solid brick; Vermiculite.

INDICADORES DE IMPACTO

Impacto social/econômico: A utilização de resíduos de mineração reduz os custos de produção e por ser um material local e ter menor densidade, o custo de logística também é reduzido, proporcionando maior viabilidade ao público com menor poder aquisitivo. **Impacto tecnológico:** A produção destes tijolos ecológicos tem impacto direto em regiões com altas temperaturas, como o nordeste brasileiro, e/ou poluição sonora, como nas grandes metrópoles, uma vez que o isolamento térmico e acústico foi aprimorado, resultando em economias nos sistemas de resfriamento/aquecimento das residências e melhora no conforto. **Impacto ambiental:** A escolha dos tijolos prensados (solo-cimento) ao invés de tijolos cozidos foi, principalmente, a não necessidade de queima em sua produção, eliminando, portanto, a emissão de gases de efeito estufa e poluentes. Além disso, a utilização de matéria-prima secundária (VE) reduziu a quantidade de solo (matéria-prima primária) necessária para a confecção dos tijolos. Outro benefício ao meio ambiente é a destinação correta destes resíduos de mineração, que muitas vezes são descartados de forma inapropriada. O trabalho impacta as áreas temáticas da Política Nacional de extensão 5 (Meio ambiente) e 7 (Tecnologia e produção), em conjunto com os Objetivos de Desenvolvimento sustentável da ONU, 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e 12 (Consumo e produção responsáveis), visto que a pesquisa propôs o aprimoramento de uma tecnologia utilizada na construção civil, objetivando melhoras nas propriedades físicas, mecânica, térmica, acústicas e com a redução de impactos ambientais.

IMPACT INDICATORS

Social/economic impact: The use of mining waste reduces production costs and because it is a local material and has lower density, logistics costs are also reduced, providing greater viability for the public with lower purchasing power. **Technological impact:** The production of these ecological bricks has a direct impact on regions with high temperatures, such as the Brazilian northeast, and/or noise pollution, such as in large metropolises, since thermal and acoustic insulation has been improved, resulting in savings in energy systems. cooling/heating of homes and improving comfort. **Environmental impact:** The choice of pressed bricks (soil-cement) instead of fired bricks was mainly due to the non-need for burning in their production, therefore eliminating the emission of greenhouse gases and pollutants. Furthermore, the use of secondary raw material (EV) reduced the amount of soil (primary raw material) needed to make the bricks. Another benefit to the environment is the correct disposal of this mining waste, which is often discarded inappropriately. The work impacts the thematic areas of the National Policy extension 5 (Environment) and 7 (Technology and production), in conjunction with the UN Sustainable Development Goals, 9 (Industry, Innovation and Infrastructure), 11 (Sustainable Cities and Communities) and 12 (Responsible consumption and production), as the research proposed the improvement of a technology used in civil construction, aiming to improve physical, mechanical, thermal and acoustic properties and reduce environmental impacts.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Peneiramento do concentrado de Vermiculita natural.....	35
Figura 02 - Esfoliação do concentrado de Vermiculita	36
Figura 03 - Moinho pulverizador de panela AMEF e porta amostra.....	38
Figura 04 - Banho de ouro.....	39
Figura 05 - Estereomicroscópio.....	40
Figura 06 - Ensaio de densidade aparente	41
Figura 07 - Picnômetro a gás.....	41
Figura 08 - Difratorômetro de Raios-X e microcomputador.....	43
Figura 09 - Ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX).....	44
Figura 10 - Ensaio dos Limites de consistência	48
Figura 11 - Ensaio de compactação.....	49
Figura 12 - Produção dos tijolos maciços de solo-cimento.....	52
Figura 13 - Preparo e realização do ensaio de resistência à compressão	54
Figura 14 - Ensaio de isolamento acústico	55
Figura 15 - Ensaio de isolamento térmico.....	57
Figura 16 - Microscopia Eletrônica de Varredura do VN	59
Figura 17 - Microscopia Eletrônica de Varredura do VE 800/10.....	60
Figura 18 - Microscopia Eletrônica de Varredura do VE 800/15.....	60
Figura 19 - Micrografia do VN.....	61
Figura 20 - Micrografia do VE 800/10.....	62
Figura 21 - Micrografia do VE 800/15.....	62
Figura 22 - FTIR dos tratamentos de concentrado de Vermiculita	66
Figura 23 - Curvas TGA e DTA dos concentrados de Vermiculita	67
Figura 24 - Difração de Raios-X do VN	68
Figura 25 - Difração de Raios-X do VE 800/10.....	69
Figura 26 - Difração de Raios-X do VE 800/15.....	69
Figura 27 - Difração de Raios-X do solo.....	73
Figura 28 - Limite de liquidez do solo	75
Figura 29 - Curva de compactação do T1	76
Figura 30 - Curva de compactação do T2	76
Figura 31 - Curva de compactação do T3	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Teor de cimento para a estabilização do solo.....	25
Tabela 02 - Caracterização dos concentrados de Vermiculita.....	37
Tabela 03 - Caracterização do solo.....	46
Tabela 04 - Tijolos maciços de solo-cimento - Tratamentos.....	51
Tabela 05 - Quantidade de corpos de prova por ensaio.....	51
Tabela 06 - Caracterização dos tijolos maciços de solo-cimento.....	53
Tabela 07 - Granulometria do concentrado de Vermiculita natural	63
Tabela 08 - Densidades aparente e real de VN e VE.....	63
Tabela 09 - Área superficial específica, volume e raio dos poros dos VE e VN	64
Tabela 10 - Análise do FTIR dos concentrados de Vermiculita.....	66
Tabela 11 - Composição química dos concentrados de Vermiculita.....	70
Tabela 12 - Composição química dos VE e VN após conversão em óxidos.....	71
Tabela 13 - Composição química da Vermiculita comercial	71
Tabela 14 - Textura do solo.....	72
Tabela 15 - Composição química do solo	74
Tabela 16 - Composição química do solo após conversão em óxidos	74
Tabela 17 - Absorção de água do TMSC	78
Tabela 18 - Resistência à compressão do TMSC	79
Tabela 19 - Barreira acústica do TMSC	80
Tabela 20 - Condutividade térmica do TMSC	81

LISTA DE QUADROS

Quadro 01 - Classificação de solos AASHTO	25
Quadro 02 - Trabalhos essenciais para o entendimento do tema	34
Quadro 03 - Absorção de água - Valores individuais.....	92
Quadro 04 - Resistência à compressão - Valores individuais	92
Quadro 05 - Barreira acústica - Valores individuais	93
Quadro 06 - Condutividade térmica - Valores individuais.....	93

LISTA DE ABREVIATURAS

ABCP - Associação Brasileira de Cimento Portland

ABS - Absorção de água

AASHTO - *American Association of State Highway and Transportation Officials*

dB - Decibéis

SBET - Área superficial específica

DRX - Difração de Raios-X

FRX - Fluorescência de Raios-X

FTIR - Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier

IP - Índice de Plasticidade

LL - Limite de Liquidez

LP - Limite de Plasticidade

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

Mha - Milhões de hectares

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

TGA - Termogravimetria

TMSC - Tijolo maciço de solo-cimento

VE - Concentrado de Vermiculita esfoliada

VE 800/10 - Concentrado de Vermiculita esfoliada a 800 °C, durante 10 minutos

VE 800/15 - Concentrado de Vermiculita esfoliada a 800 °C, durante 15 minutos

VN - Concentrado de Vermiculita natural

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	17
2. REFERENCIAL TEÓRICO	19
2.1 Problemas ambientais	19
2.2 Tijolos	21
2.2.1 Origem	21
2.2.2 Matéria-prima.....	21
2.2.3 Propriedades	22
2.2.3.1 Propriedades físicas	22
2.2.3.2 Propriedades acústicas	22
2.2.3.3 Propriedades térmicas	23
2.2.3.4 Propriedades mecânicas	24
2.2.4 Métodos de produção	26
2.2.4.1 Tijolos cozidos.....	26
2.2.4.2 Tijolos prensados	27
2.2.4.3 Tijolos com incorporação de materiais.....	28
2.3 Vermiculita	29
2.3.1 Origem	29
2.3.2 Propriedades	30
2.3.2.1 Propriedades físicas	30
2.3.2.2 Propriedades químicas	31
2.3.3 Vermiculita esfoliada	31
2.3.3.1 Esfoliação	32
2.3.3.2 Aplicações práticas	33
3. MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1 Vermiculita	35
3.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	38
3.1.2 Estereomicroscópio	39
3.1.3 Densidades	40
3.1.4 Área Superficial Específica (SBET)	42
3.1.5 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	42
3.1.6 Termogravimetria (TGA).....	42
3.1.7 Difração de Raios-X (DRX).....	43
3.1.8 Fluorescência de Raios-X (FRX).....	43

3.1.9 Esfoliação.....	45
3.2 Solo.....	45
3.2.1 Umidade.....	46
3.2.2 Difração de Raios-X (DRX).....	47
3.2.3 Fluorescência de Raios-X (FRX).....	47
3.2.4 Limites de consistência.....	47
3.2.5 Compactação.....	49
3.3 Cimento.....	50
3.4 Tijolos maciços de solo-cimento (TMSC).....	51
3.4.1 Absorção de água.....	53
3.4.2 Resistência à compressão.....	53
3.4.3 Isolamento acústico.....	55
3.4.4 Isolamento térmico.....	56
3.4.5 Durabilidade.....	57
3.5 Análise estatística dos dados.....	58
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	59
4.1 Vermiculita.....	59
4.1.1 Microscopia eletrônica de Varredura (MEV).....	59
4.1.2 Estereomicroscopia.....	61
4.1.3 Granulometria.....	63
4.1.4 Densidades.....	63
4.1.5 Área Superficial Específica (SBET).....	64
4.1.6 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR).....	65
4.1.7 Termogravimetria (TGA).....	67
4.1.8 Difração de Raios-X (DRX).....	68
4.1.9 Fluorescência de Raios-X (FRX).....	70
4.1.10 Esfoliação.....	71
4.2 Solo.....	72
4.2.1 Granulometria.....	72
4.2.2 Difração de Raios-X (DRX).....	73
4.2.3 Análise química.....	74
4.2.4 Limites de consistência.....	75
4.2.5 Ensaio de compactação.....	75
4.3 Cimento.....	77
4.4 Tijolo maciço de solo-cimento - TMSC.....	77

4.4.1 Propriedades físicas.....	77
4.4.2 Absorção de água	78
4.4.3 Resistência à compressão	79
4.4.4 Isolamento acústico	80
4.4.5 Isolamento térmico.....	81
5. CONCLUSÃO.....	82
6. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS	84
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85
ANEXOS	92

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil apresenta grande relevância no desenvolvimento socioeconômico de um país, já que é um dos principais responsáveis pelo desenvolvimento estrutural. A incessante necessidade de suprir a crescente demanda da sociedade acarretou grandes avanços tecnológicos e, infelizmente, grandes impactos ambientais. As indústrias da construção civil e demolição, juntas, consomem cerca de 40 % de toda a energia mundial, sendo ainda responsáveis por aproximadamente um terço das emissões de gases de efeito estufa no planeta (Jordan et al. 2019). Além disso, a geração e o descarte de resíduos, muitas vezes, de forma incorreta por estas indústrias, são outros problemas a serem resolvidos.

Atualmente, na alvenaria convencional, o tijolo cozido é um dos materiais mais utilizados para vedação em edificações. Apesar dos inúmeros avanços tecnológicos, sua produção apresenta uma elevada incidência de gases prejudiciais lançados na atmosfera, provenientes da queima durante o cozimento, sendo agravado pela dissipação de energia nos fornos. Portanto, este processo contribui significativamente para o aquecimento global, que tem se intensificado nos últimos anos, com previsão de um aumento médio de cerca de 1,9 °C na temperatura mundial, para o ano de 2100 (Dissanayake et al. 2020). Isso certamente promoverá uma série de desastres naturais, como derretimento das geleiras, aumento do nível do mar, extinção de espécies de animais, entre outros. Neste sentido, a necessidade de melhorias nas propriedades deste tijolo, sem encarecer o processo, se torna inevitável e imprescindível, visto que, em algumas regiões urbanas, com climas mais intensos e famílias em condições financeiras precárias, o tijolo utilizado nas residências é uma das poucas formas de proteção do calor abundante (Rabello et al. 2019).

Neste contexto, o tijolo de solo-cimento apresenta-se como uma alternativa bastante viável, em substituição ao tijolo cozido, uma vez que sua cura ocorre em temperatura ambiente, eliminando a necessidade da queima, e conseqüentemente, a emissão de gases atmosféricos e poluentes no meio ambiente (Sabino et al. 2021). Além disso, a produção deste tipo de tijolo, permite a incorporação de resíduos em sua composição, agregando utilidade a materiais que antes poderiam ser descartados na natureza de forma incorreta, reduzindo o consumo de matéria-prima primária (solo) e melhorando suas propriedades físicas, térmicas e acústicas. Um destes resíduos, com grande potencial de utilização em diversas áreas, incluindo a construção civil, é a Vermiculita, podendo ser empregado como matéria-prima secundária na produção de tijolos de solo-cimento. Neste cenário, a literatura se mostra

escassa em relação a trabalhos que fazem uso deste mineral, especificamente na produção de tijolo de solo-cimento.

A Vermiculita é um argilomineral, extraído por meio da mineração, normalmente obtida em minas a céu aberto, com grande abundância no Brasil, possuindo cerca de 8,13 % das reservas mundiais (Sutcu, 2015). Este material pode ser submetido a um tratamento térmico conhecido por esfoliação, o qual transforma a água aprisionada em seu interior em vapor. Este processo promove a expansão da Vermiculita tornando-a um material poroso e bem mais leve, com inúmeras aplicações em diversos setores (Marcos et al. 2003). Quando incorporada ao tijolo de solo-cimento, por exemplo, esse mineral tem o potencial de reduzir a densidade do novo material produzido e elevar sua área superficial específica, proporcionando, conseqüentemente, uma excelente estabilidade química e resistência ao fogo. Além disso, o argilomineral pode colaborar para o aumento no número e volume de poros, melhorando as propriedades de isolamento térmico e acústico (Koçyiğit & Çay, 2020), resultando em um produto diferenciado em relação aos materiais existentes no mercado.

Portanto, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar o desempenho das propriedades físicas, mecânica, acústica e térmica do tijolo maciço de solo-cimento com a incorporação de concentrado de Vermiculita esfoliada.

Os objetivos específicos desta tese são:

1. Produzir o concentrado de Vermiculita esfoliada;
2. Caracterizar e analisar as propriedades do solo e dos concentrados de Vermiculita, natural e esfoliados;
3. Definir o tratamento de esfoliação térmica com maior eficiência para os fins da pesquisa;
4. Definir o tratamento de tijolo maciço de solo-cimento com as propriedades mais adequadas e delimitar sua utilidade prática.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Problemas ambientais

A construção civil é um dos setores com maior relevância na sociedade contemporânea, visto que movimenta financeiramente diversas empresas, em múltiplas áreas, além de proporcionar o desenvolvimento estrutural de um país. Sabino et al. (2021) ressalta que, além de promover o desenvolvimento de diversos alicerces da sociedade, o setor também é responsável por gerar grandes impactos ao meio ambiente. Estes impactos são decorrentes de um processo de grandes gastos energéticos na retirada de matéria prima (Nath et al. 2018), dissipações energéticas no processo de confecção dos produtos (Prasertsan et al. 1997), usos excessivos de matéria-prima (Zhang, 2013), geração e descarte incorreto de resíduos (Nascimento et al. 2021) e emissões de gases poluentes na atmosfera (Skinder et al. 2015).

As indústrias, responsáveis por fornecer os materiais utilizados pelas construções, são grandes geradoras de poluição física (resíduos), sonora (ruídos) e atmosférica (gases poluentes). Na indústria de granito, por exemplo, a quantidade de resíduos gerados, representa cerca de 20 a 25 % de toda a produção de resíduos gerada no planeta. O grande problema é que na maioria das vezes, estes resíduos não têm uma destinação ecológica. Sendo assim, uma das maneiras encontradas para mitigar o desgaste ambiental é a combinação de resíduos industriais com solo, buscando desenvolver novos materiais mais sustentáveis. Como resultado, estes materiais compósitos podem apresentar melhorias em seu comportamento mecânico e durabilidade, além de reduzir o uso de agregados ou ligantes ao novo material produzido (Nascimento et al. 2021). Um dos possíveis produtos para a incorporação de resíduos é o tijolo.

No caso do tijolo cerâmico, é utilizado o solo rico em argila (sendo a mais utilizada, a argila-sílica-feldspato) para sua produção. No processo de extração desta matéria-prima (solo argiloso) ocorre a degradação de terras produtivas para a agricultura (Andreola et al. 2016), portanto, uma das formas de reduzir o uso de solo seria utilizar uma matéria-prima secundária, a exemplo os resíduos. O País com maior produção de tijolo é a China, seguido da Índia. A China tem enfrentado uma grande escassez de argila, fato este que tem levado o governo a uma série de medidas para limitar o uso de tijolos produzidos com solo argiloso (Zhang, 2013). A Índia, por sua vez, segue o mesmo destino, com 47 Milhões de hectares (Mha) degradação física, 24 Mha erosão hídrica, 23 Mha degradação química, 9 Mha erosão

eólica e 12 Mha, resultado da combinação destes processos, totalizando mais de 114 Mha degradados (Nath et al. 2018).

A incorporação destes resíduos nos compósitos reduz a degradação ambiental e o uso da matéria-prima primária, entretanto, outro tópico de extrema importância são as emissões de gases poluentes na atmosfera, pois estes são responsáveis pela intensificação do aquecimento global. Em decorrência deste fato, está previsto um aumento médio nos valores da temperatura global de até 1,9 °C para o ano de 2100 (Dissanayake et al. 2020). Uma das possíveis alternativas encontradas para reduzir as emissões destes gases está na produção de materiais que não necessitam da queima em sua produção, como é o caso do tijolo de solo-cimento. A retirada da queima do processo de fabricação reduziria a emissão de 20,18 trilhões de gramas de CO₂ anuais na Índia (Nath et al. 2018).

Englobando os tópicos discutidos anteriormente, pesquisas verificaram a possibilidade de incorporação de diversos materiais junto ao tijolo de solo-cimento, tais como: resíduos de corte de granito (Nascimento et al. 2021), resíduos de tijolos de barro (Kongkajun et al. 2020) e resíduos de fábrica de celulose (Siqueira & Holanda, 2013). Os autores da primeira pesquisa apontaram para a viabilidade de incorporar resíduos de corte de granito ao tijolo, reforçando a importância do controle da umidade e absorção de água do material, uma vez que o resíduo tem uma maior capacidade de absorção. A segunda pesquisa também apontou para a viabilidade da incorporação de resíduos de tijolos de barro ao tijolo. Os autores concluíram que a substituição de 10 % de matéria-prima por resíduos apresentou uma resistência à compressão mais satisfatória, além de ter colaborado na redução dos valores de densidade e condutividade térmica. Já a terceira pesquisa apontou que os tijolos produzidos com até 20 % dos resíduos de fábrica de celulose, atendem aos requisitos para serem utilizados como materiais de construção civil. Acima deste valor, os autores não recomendaram a utilização, uma vez que o produto teve sua resistência mecânica reduzida, aliada a um aumento na capacidade de absorção de água.

Os tijolos de solo-cimento, com incorporação de matérias-primas secundárias vem ganhando notoriedade, pelo apelo sustentável e propriedades satisfatórias. Além disso a produção de um tijolo ecológico corrobora com três dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da agenda da ONU 2030:

- ✓ 9. Indústria, inovação e infraestrutura;
- ✓ 11. Cidades e comunidades sustentáveis;
- ✓ 12. Consumo e produção responsáveis.

Portanto, existe a necessidade de desenvolver um tijolo ecológico, ou seja, um tijolo que utiliza dos recursos disponíveis na região e causa menores impactos ambientais.

2.2 Tijolos

2.2.1 Origem

O solo é utilizado como matéria-prima para construção de casas a milhares de anos. Os tijolos de argila seca foram usados pela primeira vez em 8.000 a.C. Dentre os materiais/métodos de construção utilizando argila seca, destacam-se os tijolos de adobe, Pau-a-pique e Taipa de pilão. Em 4.500 a.C. os tijolos de argila cozida começaram a ser utilizados (Zhang, 2013). Atualmente, um dos materiais mais usados pela construção civil são os tijolos cerâmicos. De fato, o avanço tecnológico alterou a forma de aplicação e produção destes materiais, entretanto, o tijolo continua sendo amplamente utilizado. Por esta razão, a realização de pesquisas nesta área é de fundamental importância e inevitável, ampliando a produção (para suprir as demandas das indústrias) e reduzindo custos (Dhandhukia et al. 2013).

A produção anual mundial de tijolos é de cerca de 1391 bilhões de unidades, sendo a China e a Índia (18 %) os maiores produtores mundiais (Nath et al. 2018). O aumento da demanda deste produto é crescente, uma vez que o setor de construção tem relação direta com desenvolvimento do país. Em países em crescimento econômico, nos quais ocorrem a urbanização, os tijolos são cada vez mais utilizados nas construções para moradias e desenvolvimento do setor comercial (Zhang, 2013).

Por conseguinte, o tijolo de solo-cimento, vem ganhando visibilidade devido a sua produção sustentável (produção sem queima e baixo consumo de energia), facilidade de incorporação de resíduos e boas propriedades mecânicas, acústicas e térmicas. Sabino et al. (2021) ressalta que este produto já possui diversas aplicações como tijolo de alvenaria, em camadas de fundações, e, também é base para pavimentos rígidos e flexíveis de estradas e aeroportos.

2.2.2 Matéria-prima

O tijolo é um produto de baixo custo e fácil produção, podendo ser do tipo cozido (utiliza fornos) ou não cozido (sem a utilização de fornos, sendo apenas prensado). Para a sua

produção, depende apenas da matéria-prima (solo) e cimento (tijolo de solo-cimento) e, no caso do tijolo cozido, do combustível (biomassa).

Os solos indicados para a confecção dos tijolos de solo-cimento são classificados como arenosos, devido à grande presença de areia grossa, que juntamente com o cimento, auxilia na aglomeração dos grãos menores. A NBR 10833 (ABNT, 2012) define os limites de granulometria do solo para ser utilizado na confecção de tijolos de solo-cimento, sendo necessário que o material passe 100 % pela peneira de 4,8 mm e de 10 a 50 %, pela peneira de 0,075 mm, além de apresentar Limite de Liquidez (LL) menor ou igual a 45 % e Índice de Plasticidade (LP) menor ou igual a 18 %, nesta ordem.

O cimento Portland, utilizado como uma das matérias-primas, é proveniente da moagem de clínquer, podendo ser de diferentes tipos e conter diferentes aditivos (CP-I, CP-II, CP-II-E-32, etc). O material é um pó fino que apresenta propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes, que, quando em contato com a água, endurece. De acordo com Metzker et al. (2021), ao adicionar cimento Portland ao solo, a absorção e perda do material não provocam variações volumétricas consideráveis. Também não há sua deterioração quando submerso em água; o que se observa é a elevação da resistência a compressão e de sua durabilidade.

2.2.3 Propriedades

2.2.3.1 Propriedades físicas

A densidade real e aparente do tijolo tem grande influência nas demais propriedades. A densidade real corresponde ao volume ocupado pelo material, não levando em consideração sua porosidade. Já a densidade aparente determina a quantidade de massa do material, em relação ao volume. A incorporação de um material poroso no tijolo de solo-cimento, pode reduzir sua densidade e proporcionar melhores desempenhos térmicos e acústicos (Moraes et al. 2019).

2.2.3.2 Propriedades acústicas

No que se refere as propriedades acústicas, o ruído ambiental é um aspecto cada vez mais comum, devido ao crescente processo de urbanização. Neste sentido, construções e áreas ao redor de aeroportos ou estações ferroviárias, podem ser fontes significativas de exposição

ao ruído. A poluição sonora tornou-se uma das quatro principais poluições do mundo moderno, prejudicando gravemente a saúde física e mental das pessoas. O controle da poluição sonora e o aprimoramento da qualidade do som tem sido uma grande preocupação nos últimos anos (Sailesh et al. 2022; Wang et al. 2021).

De acordo com Kaya (2007), a emissão acústica é a classe de fenômenos em que uma onda elástica, na faixa do ultrassom, geralmente entre 20 KHz e 1 MHz, é gerada pela rápida liberação de energia da fonte no interior de um material. Esta onda se propaga através do sólido para a superfície, onde pode ser registrada por um ou mais sensores.

A poluição sonora, especialmente em baixas frequências, pode desencadear diversos problemas aos seres humanos, sendo a mesma de difícil controle devido ao seu comprimento de onda ser mais longo e apresentar maior poder de penetração. Além disso, atualmente, a maioria dos materiais apresentam baixo desempenho de absorção do som. Portanto, reduzir o ruído de baixa frequência tornou-se uma tendência nas pesquisas atuais (Sailesh et al. 2022; Wang et al. 2021).

Pesquisas realizadas em diversas outras áreas como acústica do asfalto (Sun et al. 2021), acústica do favo de mel (Wang et al. 2021) e espuma cerâmica (Sun & Liu, 2021), encontraram fatores comuns para a redução de ruído. Segundo os autores, a espessura da camada e a porosidade do material, bem como a do agregado, tem efeito significativo na absorção sonora. Além disso, o tamanho da menor partícula e sua maior espessura, segundo Sun et al. (2021), podem influenciar a absorção do som.

Dessa forma, até o presente momento, o uso de materiais que absorvem as ondas sonoras é o principal método para lidar com a poluição sonora. Normalmente, materiais porosos são os mais utilizados para absorção de ruído, sendo o tijolo uma solução efetiva e barata (Sun & Liu, 2021).

2.2.3.3 Propriedades térmicas

Aproximadamente um terço da energia total consumida no mundo é utilizada para o aquecimento e resfriamento de residências (Sutcu, 2015). A economia de energia é um fator de extrema importância devido aos fatores econômicos e ambientais. Uma das maneiras de economizar energia é promover o aperfeiçoamento das propriedades de isolamento do tijolo. Este desempenho térmico depende da geometria e propriedades do material (Sutcu, 2015).

A taxa de mortalidade de idosos em regiões tropicais, com baixas condições financeiras, está diretamente relacionada com a precariedade da refrigeração de suas

residências. Portanto, é necessário o desenvolvimento de pesquisas com o intuito de aprimorar os produtos atuais, como é o caso do tijolo, tornando-o mais eficientes, sem, contudo, encarecê-los (Rabello et al. 2019).

Em geral, a condutividade térmica dos tijolos de argila a granel é aproximadamente 1.070,4 W/mK, dependendo das matérias-primas utilizadas, tipo de processamento, temperaturas de queima e densidades de queima. Quando transformado em um produto extrudado, com perfurações verticais, sua condutividade térmica pode ser muito menor, em torno de 0,08 W/mK (Sutcu, 2015). A critério de comparação, trabalhos encontrados na área apresentam variações nos valores de condutividade térmica do tijolo de solo-cimento entre 2,060 e 1,707 W/m °C (Metzker et al. 2021) e 0,387 e 0,209 W/m °C (Sabino et al. 2021), de acordo com os aditivos utilizados durante o processo de fabricação. Estes tijolos apresentam como principal componente responsável pelo isolamento térmico, redução da densidade e aumento da porosidade do material utilizado.

2.2.3.4 Propriedades mecânicas

Para a confecção dos tijolos de solo-cimento, é necessário a utilização de estabilizadores, com o objetivo de deixá-lo mais resistente e tornando-os mais adequado ante as deformações quando solicitado por uma carga. De acordo com Sabino et al. (2021) o solo pode ser estabilizado de três formas: mecânica (compactação do solo), física (incorporação de fibras ou partículas no solo) e química (ligantes ou aditivos ao solo). A compactação do solo serve para rearranjar as partículas e reduzir os vazios, enquanto na estabilização química, os ligantes auxiliam na junção e redução da perda de material.

Neste contexto, é importante determinar alguns parâmetros, como o grau de compactação. De acordo com Sabino et al. (2021), quanto mais compactado o solo estiver, maior será sua densidade e, por consequência, melhor suas propriedades físicas. Metzkerker (2021) ressalta também a importância da determinação da umidade ótima, pois além de auxiliar na compactação, pode propiciar melhores condições de trabalhabilidade.

No que se refere a estabilização química, em solos com altos teores de argila, o material mais indicado é a cal. Em contrapartida, o Cimento Portland é indicado como estabilizador em solos com baixos teores de argila, proporcionando características como alta resistência mecânica, resistência à água e redução do inchamento de contração (Ferreira et al. 2008). A fim de determinar o teor de cimento a ser utilizado para a estabilização do tijolo de solo-cimento, deve-se classificar o solo, de acordo com os protocolos da *American*

Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO, 2017), apresentado na Quadro 01. Ao determinar a classificação do solo, o teor de cimento, em massa, recomendado para estabilizar o tijolo de solo-cimento é indicado pela Tabela 01.

Quadro 01 - Classificação de solos AASHTO.

Classificação Geral	Materiais granulares (35% ou menos passando na peneira nº 200)							Materiais siltosos e argilosos (mais de 35% passando na peneira nº 200)			
	A-1		A-3	A-2				A-4	A-5	A-6	A-7
	A-1-a	A-1-b		A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7				
Peneiração: % que passa: Nº 10 Nº 40 Nº 200 (p)	50 máx. 30 máx. 15 máx.	50 máx. 25 máx.	51 mín. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 mín.	36 mín.	36 mín.	36 mín.
Características da fração que passa nº 40 Limite de Liquidez - LL (%) Índice de Plasticidade IP (%)				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de Grupo	0		0	0		4 máx.		8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais que predominam	Pedra Britada pedregulho e areia		Areia fina	Areia e areia silosa ou argilosa				Solos Siltosos		Solos argilosos	
Comportamento geral como subleito	Excelente a bom							Fraco a pobre			

Fonte: Classificação Rodoviária HRB (2017).

Tabela 01 - Teor de cimento para a estabilização do solo.

Classificação HRB	Teor de cimento em massa
A1-a	5
A1-b	6
A2	7
A3	8
A4	10
A5	10
A6	12
A7	13

Fonte: ET - 35 (ABCP, 1986).

Ao utilizar o cimento no tijolo, é essencial proporcionar uma cura adequada para que o tijolo possa consolidar adequadamente. Os primeiros 28 dias de cura tem grande influência nas propriedades físicas do tijolo de solo-cimento, sendo uma das mais afetadas, a resistência à compressão. Neste cenário, o valor médio da resistência à compressão dos tijolos de solo-cimento deve ser superior a 2,00 MPa e o valor individual não pode ser inferior a 1,70 MPa. Já o valor médio para a absorção de água deve ser menor que 20 % e o valor individual não deve ultrapassar 22 %, conforme a NBR 8491 (ABNT, 2012).

A resistência à compressão do tijolo é de extrema importância, sendo um fator determinante para sua viabilidade. Jordan et al. (2019) confeccionou tijolos de solo-cimento,

substituindo 0, 30 e 40 % do solo por cinzas de bagaço de cana-de-açúcar. Os resultados encontrados variaram entre 1,27 e 1,88 MPa, portanto inferiores aos mínimos exigidos pela norma supracitada, confirmando um resultado não satisfatório. Castro (2019) incorporou casca de café no tijolo de solo-cimento substituindo pelo cimento em teores de 0, 5, 10, 15 e 20 %, sendo testados com 14, 28 e 56 dias. O autor encontrou que o único tratamento que atendeu os limites mínimos da norma foi o 0 % com 56 dias, com um valor de 2,16 MPa, portanto, sendo adequado para utilização, de acordo com este parâmetro. Além disso, o pesquisador afirma que embora os outros tratamentos não tenham atendido a norma técnica, ainda poderiam ser utilizados em substituição ao adobe, que requer uma resistência à compressão mínima $\leq 0,7$ MPa.

2.2.4 Métodos de produção

Os dois principais métodos utilizados para a produção de tijolos são: cozidos e prensados. Para a confecção de tijolos de barro cozido, a matéria prima é levada aos fornos, resultando em seu endurecimento. Na produção do tijolo prensado (tijolo de solo-cimento), o solo é misturado ao cimento e água, até atingir o nível ideal de umidade. Em seguida, o material é prensado com a posterior realização da cura em sete dias. A não utilização de fornos no processo de endurecimento do tijolo resulta em um produto com menor impacto ambiental (Metzker et al. 2021).

De acordo com a NBR 8491 (ABNT, 2012), o tijolo de solo-cimento pode ser maciço ou vazado. Para o tijolo maciço, seu volume deve ser superior ou igual a 85 % de seu volume total aparente. Em contraponto, para o tijolo vazado este valor deve ser inferior a 85 %.

2.2.4.1 Tijolos cozidos

Os fornos de produção de tijolo cozidos apresentam uma tecnologia pouco eficiente, com grandes perdas energéticas e emissões de gases de efeito estufa/poluentes (Nath et al. 2018; Skinder et al. 2015; Zhang, 2013). As dissipações de energia no processo de produção dos tijolos acontecem desde o aquecimento inicial da estrutura maciça do forno, do resfriamento dos tijolos (800 a 900 °C até a temperatura ambiente) até a liberação dos gases de exaustão quente (500 °C em média) (Prasertsan et al. 1997).

Os principais gases poluentes gerados e emitidos na produção de tijolos, com fornos de queima, são: dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x), monóxido de carbono

(CO), ozônio troposférico (O₃) e metais pesados, além é claro, de materiais particulados suspensos. Estimativas indicam que as emissões anuais de poluentes de uma indústria de tijolos são de cerca de 80 toneladas de partículas, 30 toneladas de carbono, 7 toneladas de NO_x e 5 toneladas de SO_x. Os tijolos de barro, em média, apresentam uma energia incorporada de aproximadamente 2,0 kWh e liberam cerca de 0,41 kg de dióxido de carbono (CO₂) por tijolo (Skinder et al. 2015).

Neste contexto, a indústria de construção e demolição é responsável por 40 % da energia consumida em todo o mundo, e, por um terço das emissões de gases do efeito estufa, sendo, portanto, essencial, encontrar diferentes formas de se reduzir esse impacto ambiental. Uma destas maneiras é a produção e utilização de tijolos não cozidos, eliminando assim as perdas de energia no processo e a emissão de gases atmosféricos (Jordan et al. 2019).

2.2.4.2 Tijolos prensados

A produção de tijolos apresenta vários problemas a serem mitigados, desde a degradação ambiental, na extração da matéria-prima, até sua escassez. Além disso, os fornos, utilizados na produção dos tijolos cozidos, apresentam perdas energéticas e a queima gera gases de efeito estufa e poluentes. Portanto, é necessário desenvolver novos métodos de produção com menor consumo de matéria-prima e melhorias na eficiência dos fornos. Há um crescente número de pesquisas sobre tijolos prensados com incorporação de materiais, que tem se apresentado como solução para parte das questões ambientais (Rabello et al. 2019; Dhandhukia et al. 2013; Zhang, 2013). A exemplo do trabalho de Marchiori (2020), que ao incorporar cal, pó de rocha e resíduo de mármore ao tijolo de solo-cimento, encontrou valores médios de resistência à compressão de 2,36, 4,06 e 3,68 MPa, e para absorção de água de 22,6, 17,3 e 14,2 respectivamente. Portanto, os resultados foram satisfatórios, pois atenderam as exigências das normas técnicas, exceto a absorção de água, do tratamento com cal, que ultrapassou o limite estabelecido de 20 %. Estes resultados apontam a eficiência e viabilidade de incorporação de materiais em tijolos de solo-cimento.

Uma das formas de se reduzir a degradação ambiental é a utilização de tijolos não cozidos, ou seja, não queimados em forno, a exemplo o tijolo de solo-cimento. Se forem adequadamente estabilizados, o processo de prensagem do tijolo de solo-cimento remove a necessidade de queima do material resultando em redução de custos e na eliminação de emissão de gases atmosféricos e poluentes, proveniente de fornos (Metzker et al. 2021).

2.2.4.3 Tijolos com incorporação de materiais

Outra maneira de diminuir o desgaste ambiental é incorporando materiais no tijolo de solo-cimento. A produção de tijolos tem utilizado de forma excessiva e sem controle as matérias-primas naturais e por este motivo carece de subprodutos, a exemplo materiais orgânicos, inorgânicos ou mistos. A incorporação de subprodutos na produção de tijolos reduz o descarte incorreto destes materiais e agrega novas características ao compósito; como o aumento da porosidade, redução da plasticidade da matéria-prima primária, redução da massa volumétrica, aumento na resistência à compressão e da condutividade térmica (Arsenović et al. 2015; Velasco et al. 2014).

Ao pesquisar sobre materiais lignocelulósicos (bambu, casca de café e casca de arroz) como reforço de tijolos de solo-cimento, Sabino et al. (2021) apontou que o acréscimo destes resíduos aumentou a porosidade, absorção de água e o isolamento térmico, enquanto a densidade e resistência mecânica foi reduzida. Os resultados encontrados na pesquisa indicaram a efetividade do isolamento térmico em todos os tratamentos, com a condutividade térmica reduzindo entre 8,18 e 46,04 %, entretanto os resultados da resistência à compressão também reduziram entre 20,09 e 63,47 %, evidenciando a necessidade de encontrar a melhor proporção para aprimorar o isolamento térmico, com menor degradação das propriedades físicas.

A incorporação de materiais residuais e orgânicos nos tijolos tem sido amplamente estudada, a exemplo de resíduos de tijolo e argila (Kongkajun et al. 2020), bagaço de cana-de-açúcar (Jordan et al. 2019), casca de café (Castro, 2019) e casca de arroz (Ferreira et al. 2008). É importante ressaltar que a maioria dos resíduos possuem contaminantes, como exemplo metais pesados nas cinzas volantes (Pacheco-torgal et al. 2012) e contaminantes nos resíduos de minas de cobre (Ahmari & Zhang, 2013). Portanto, é essencial seguir as normas técnicas para utilização e imobilização de forma segura e eficaz destes materiais. A produção e aplicação de tijolos a partir de resíduos se encontra estagnada devido a lenta aceitação da indústria e pelo público. Para promover o produto e mudar essa situação, mais trabalhos precisam ser propostos, não só nos aspectos técnicos, econômicos e ambientais, mas também relacionados a política governamental, educação pública voltada para reciclagem de resíduos e ao desenvolvimento sustentável (Zhang, 2013).

Portanto, a escolha das matérias-primas para a produção dos tijolos requer ensaios preliminares. Além disso, existem métodos matemáticos utilizados para a otimização de produção de tijolos. Como exemplo podemos citar técnicas de otimização das habilidades de

isolamento, que preveem o número e local de vazios na estrutura, através do método de volumes finitos (Arsenović et al. 2015). Outra melhoria de eficiência está na temperatura adequada de queima dos subprodutos, composição química e uso de combustíveis menos poluentes por energia produzida (Arsenović et al. 2013).

Rabello & Ribeiro (2021) confeccionaram tijolos de solo-cimento com a incorporação de Vermiculita, em seu estado natural e expandido, nas proporções de 70, 80 e 90 %. Os autores ressaltaram um grande potencial de isolamento térmico do produto, com o tratamento de 90 % de Vermiculita esfoliada alcançando 93 % de redução térmica. Apesar desta vantagem, o aperfeiçoamento desta propriedade deve-se ao aumento de porosidade, que por consequência reduz a resistência à compressão do tijolo.

Nestas condições, incorporar Vermiculita esfoliada nos tijolos de solo-cimento, em substituição de parte do solo, pode agregar algumas características como a porosidade, que em conjunto com as cavidades do sistema, podem garantir propriedades térmicas e acústicas aprimoradas ao novo compósito. Além disso, esses elementos podem ser produzidos em formatos maiores mantendo altos níveis de força compressiva (Arsenović et al. 2013). Esta é uma estratégia muito importante, uma vez que uma das grandes dificuldades enfrentadas é manter a resistência à compressão dentro dos valores propostos pela norma, pois quanto maior a porosidade, tende-se a uma menor resistência. Além disso, o Brasil possui um número elevado de reservas deste argilomineral, o que contribui para a viabilidade de pesquisas nesta área (Curbelo et al. 2006).

2.3 Vermiculita

2.3.1 Origem

O nome Vermiculita é derivado do latim *vermicularis* (verme), devido as suas colunas curvas, alongadas e torcidas. Ela tem origem secundária, resultado da alteração de partículas macroscópicas de biotita e flogopita, clorita, piroxênio ou outros minerais semelhantes (Rashad, 2016; Basset, 1963). Este argilomineral é encontrado em terrenos de topografia ondulada e montanhosa, originários de rochas ígneas, principalmente aquelas com predominância de feldspato, como o granito e sienito. Outras fontes seriam as grandes folhas nos diques de pegmatito, lavas felsíticas, pórfiros, gnaisses e xistos (Curbelo et al. 2006). Segundo Sutcu (2015), as reservas mundiais do minério totalizam 217.700.000 toneladas, sendo encontrados principalmente na África do Sul (41 %), EUA (21 %), China (21 %) e

Brasil (8,13 %). As principais reservas brasileiras estão localizadas nos estados de Goiás (9,0 milhões de toneladas), Bahia (3,3 milhões de toneladas), Piauí (2,7 milhões de toneladas), Paraná (106 mil toneladas) e Minas Gerais (3,9 mil toneladas).

O interesse pelo mineral tem aumentado nos últimos anos, sendo evidente o constante aumento do número pesquisas realizadas na área, como exemplo da desidratação da Vermiculita pela pressão a vácuo (Marcos et al. 2003), Esfoliação através do tratamento químico de peróxidos de hidrogênio (Marcos & Rodríguez, 2014) e produção de tijolos prensados de Vermiculita natural e expandida (Rabello et al. 2019). Devido ao número elevado de reservas no Brasil, torna-se tecnicamente viável sua utilização em qualquer projeto no setor da construção civil, sem necessidade de dependência externa. Os fatores econômicos que influenciam os preços do mineral variam com a forma comercializada, o tipo, a quantidade e o seu uso final previsto (Curbelo et al. 2006).

2.3.2 Propriedades

2.3.2.1 Propriedades físicas

A Vermiculita é um argilomineral natural de textura terrosa, não abrasiva, lamelar e escamosa e peso específico de 2,3 a 2,5 g/cm³. Apresenta clivagem perfeita (001) e fraturas em lâminas flexíveis, não elásticas, hábitos tabulares e ensaios prognósticos em via-úmida sofre decomposição pelo H₂SO₄ (Curbelo et al. 2006).

Sua cor, composição de grãos, forma e brilho estão intimamente relacionados com sua origem. Geralmente, tem cor amarelo dourado ou marrom, ocasionalmente matizado esverdeado com brilho rosa nacarado. A cor da partícula pode parecer prateada ou vermelho-dourada dependendo da ocorrência de Fe₂O₃ (Rashad, 2016; Curbelo et al. 2006).

Na forma natural tem tamanho e formato de mica, comercializada com partículas maiores que 1 mm. Apresenta efeitos de desordem e capacidade de inchaço, desidratação e reidratação, devido as suas camadas interlamelares de água. Este processo depende da temperatura, pressão, composição química, tamanho de partícula e umidade relativa (Marcos et al. 2009).

Em relação aos pontos negativos do argilomineral, destaca-se sua grande captação de água e baixa fobia de absorção de contaminantes orgânicos, devido a superfície da argila ser fortemente hidrofílica. Existem diversas formas de hidrofobizar sua superfície, caso seja

necessário, sendo algumas com revestimento de polímero, revestimento de cera de Carnaúba e modificação de superfície (Purceno et al. 2011; Medeiros et al. 2009).

2.3.2.2 Propriedades químicas

A Vermiculita apresenta pH 7 e sua fórmula química geral é $(\text{Mg}, \text{Fe}^{3+}, \text{Al})_3 (\text{SiAl})_4 \text{O}_{10} (\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$. O minério consiste principalmente de SiO_2 (37-42 %), MgO (14-12 %), Al_2O_3 (10-13 %), Fe_2O_3 (5-17 %), H_2O (8-18 %) e FeO (1-3 %), sendo as porcentagens referentes ao peso. A variação da composição química, em grandes proporções, pode refletir em suas propriedades físicas (Rabello et al. 2019; Rashad, 2016).

2.3.3 Vermiculita esfoliada

Por conter camadas interlamelares de água, a Vermiculita pode sofrer processos de desidratação-hidratação que dependem de temperatura, pressão, composição química, tamanho de partícula e umidade relativa (Marcos et al. 2003). Este processo resulta na produção da Vermiculita expandida (esfoliada), que é um material inorgânico poroso, com baixa densidade (Curbelo et al. 2006) e propriedades de isolamento térmico e acústico (Rabello et al. 2019). Além disso, é quimicamente inerte, o que a torna atraente para uso como agregado leve e enchimento para isolamento térmico (Sutcu, 2015). Estas características garantem diversas aplicações tecnológicas e ambientais ao material, proporcionando aprimoramentos ao novo compósito e aplicando-o de forma ecologicamente correta (Mesquita et al. 2012).

A estrutura da Vermiculita apresenta de 5 a 20 % de água que pode ser evaporada no processo de esfoliação (expansão). Neste processo, o material se torna altamente poroso, e quando incorporado ao tijolo de solo-cimento, corrobora com suas propriedades de isolamento térmico e acústico, devido aos espaços vazios remanescentes em suas camadas (Freitas et al. 2017). Além disso, a porosidade garante um material mais leve, resultando em reduções de custos de transporte e no custo estrutural da obra, além de aumentar a eficiência e qualidade do trabalho (Kongkajun et al. 2020).

Uma das principais vantagens em aumentar a porosidade do material e, conseqüentemente, sua eficiência como isolante térmico, é a redução do consumo energético nas residências, uma vez que reduz a necessidade do uso de eletrodomésticos para o controle da temperatura interna. O trabalho de Ribeiro (2020) apresenta uma redução de

aproximadamente 19,4 % na condutividade térmica, ao incorporar 3 % de Vermiculita ao tijolo de solo-cimento. Nesta mesma amostra, também houve uma redução no valor da resistência à compressão de 0,27 MPa, quando comparada ao grupo controle. Portanto, a otimização do processo é necessária, uma vez que aumentando a porosidade, as propriedades mecânicas podem ser inversamente alteradas.

2.3.3.1 Esfoliação

O processo de esfoliação (expansão) da Vermiculita pode ocorrer de forma química ou térmica. No processo químico, são utilizados principalmente peróxidos de hidrogênio (Marcos & Rodríguez, 2014), ativações por sódio, da Vermiculita (Moraes et al. 2019) ácidos (Santos et al. 2015). Neste sentido, Hillier et al. (2013) aponta o peróxido de hidrogênio como método químico mais eficaz para esfoliação do argilomineral.

A esfoliação térmica é o método mais conhecido e utilizado, onde a Vermiculita é rapidamente exposta a elevadas temperaturas. Este processo é comercialmente chamado aquecimento de choque ou instantâneo (Hillier et al. 2013). O autor ainda enfatiza que o aquecimento lento não resulta em esfoliação e que sua efetividade também está relacionada com os tamanhos das partículas da Vermiculita, sendo mais efetivo em partículas maiores.

No processo térmico, quando aquecida a 650 - 950 °C, ela se expande, em um processo conhecido como esfoliação (Rashad 2016). Neste processo é produzido um material altamente poroso com modificação em sua estrutura, com a formação de enstatita (Mesquita et al. 2012). Caso seja aquecido a um valor superior a 1000 °C existe a possibilidade de conversão em clinoenstatita, podendo deformar o material e degradar sua característica isolante. Sua composição química não muda durante o processo, apenas a água ligada é removida (Purceno et al. 2011; Curbelo et al. 2006).

Neste processo, ocorre a redução da densidade aparente em 10 - 11 vezes (80-120 kg/m³), acompanhado de um aumento de 8 a 30 vezes, em relação ao seu tamanho original. Apresenta baixa condutividade térmica (0,04-0,12 W/m.K), ponto de fusão relativamente alto (1240-1430 °C) e coeficiente de absorção de som na faixa de 0,7-0,8, a uma frequência de 1 kHz. Além disso, apresenta baixa formação de poeira e propriedades abrasivas. A absorção de água pode atingir 10 %, enquanto sua higroscopicidade não ultrapassa 3 % em peso, a 98 % de umidade do ar (Rabello et al. 2019; Rashad, 2016).

Quando ocorre uma expansão superior a 10 vezes, em relação ao seu tamanho original, a Vermiculita ser classificada como de boa qualidade (Rashad, 2016). Uma expansão inferior

a 10 vezes, leva a mesma a uma classificação de baixo grau. O grau de expansão depende de alguns fatores como taxa de aquecimento, tempo de espera na temperatura de pico, taxa de resfriamento, teor de umidade, estrutura das hidros micas, fase composição e técnica utilizada para moagem do material (Rabello et al. 2019).

2.3.3.2 Aplicações práticas

As principais aplicações da Vermiculita estão na agricultura (como alimentação animal, fertilizante e pesticidas), na construção (como concreto, isolante térmico e acústico), na horticultura (como germinador de semente, semeador) e na indústria (usada na filtração, dispersão, adsorvente, isolante de temperaturas altas e baixas) (Curbelo et al. 2006). No Brasil os principais usos industriais são: cortiça mineral para isolantes térmicos, revestimento, isolante térmico para tubulações industriais, massa para conexões de tubos isolantes, argamassa para pré-fabricação de tijolos, placas e blocos refratários isolantes, argamassa para isolantes acústicos, isolantes acústicos e térmicos para aplicação por pistola pneumática, agregados leves/ultraleves e filtros para máscara de proteção. Outras aplicações também são conhecidas, como a utilização na piscicultura, como isolante térmico dos tanques de criação de peixes e em embalagens de produtos sensíveis ao choque mecânico (Rashad 2016; Curbelo et al. 2006).

A aplicação de Vermiculita é muito comum como organofillers em matrizes poliméricas, nanocompósitos de biopolímeros, absorventes (especialmente para contaminantes e sorção de metais pesados), catalisador, portadores para materiais com propriedades de fotodegradação e cerâmicas (Barabaszová & VALÁLKOVÁ, 2013). Quando hidrofobizada, podem ser aplicadas na remoção de óleo de acidentes de derramamento. Com a dispersão de nano cristais de celulose em suas camadas internas, a Vermiculita expandida apresenta camadas de carbono nanoestruturados, que as hidrofobizam em sua superfície aumentando a absorção do óleo (Mesquita et al. 2012).

A viabilidade da incorporação de Vermiculita esfoliada em telhas vem sendo estudada. Viana et al. (2022) indica que esta combinação reduz o peso seco e a condutividade térmica, sem afetar a durabilidade do compósito. O resultado com melhor otimização foi com 31 % de incorporação de Vermiculita. Ao pesquisar sobre a incorporação de Vermiculita esfoliada em compósitos de cimento Koçyiğit & Çay (2020) encontraram reduções no valor da densidade do compósito e elevação em sua porosidade. Os autores apontaram um grande potencial de utilização da Vermiculita como isolante térmico e acústico.

A Vermiculita também apresenta aplicações práticas em tijolos-cimento. O argilomineral serve simultaneamente como substrato adequado para ancorar nanopartículas de CeO_2 e como fonte de Mg, Al e Si, importantes e necessários para a produção de cordierita. Ao misturar-se com minerais de argila, influenciam o tamanho, a morfologia dos poros e a quantidade das fases minerais presentes nos compósitos de cordierita (Valálková et al. 2019; Valálková et al. 2013).

Ao incorporar 1,5 e 3,0 % de Vermiculita ao tijolo de solo-cimento, Ribeiro (2020) observou uma redução no valor da condutividade térmica no material, de 4,15 para 3,34 $\text{Wm}/^\circ\text{C}$. Para as mesmas proporções de fibras de vidro inseridas junto ao compósito, o valor observado para a condutividade térmica reduziu de 3,28 para 3,20 $\text{Wm}/^\circ\text{C}$. Quando comparadas, nota-se a grande influência que a Vermiculita exerce sobre esta propriedade, entretanto é necessário expandir o intervalo de concentração do argilomineral, buscando a otimização do produto.

O Quadro 02 destaca alguns dos trabalhos utilizados no referencial teórico, que agregam informações essenciais sobre o tema da pesquisa.

Quadro 02 - Trabalhos essenciais para o entendimento do tema.

Autor	Título	Ano
Nath	Fired Bricks: CO ₂ Emission and Food Insecurity	2018
Rabello et al.	Produção de tijolos ecológicos de vermiculita e poliuretano	2019
Metzker et al.	Soil-cement bricks development using polymeric waste	2021
Dissanayake et al.	Sustainable gasification biochar as a high efficiency adsorbent for CO ₂ capture: a facile method to designer biochar fabrication	2020
Ribeiro	Desempenho de tijolos solo cimento produzidos com fibra de vidro e vermiculita	2020
Koçyiğit & Çay	The Effect of Natural Resin on Thermo-physical Properties of Expanded Vermiculite–Cement Composites	2020
Rabello & Ribeiro	A novel Vermiculite/vegetable polyurethane resin-composite for thermal insulation eco-brick production	2021
Nascimento et al.	Soil-cement brick with granite cutting residue reuse	2021
Sabino et al.	Lignocellulosic materials as soil–cement brick reinforcement	2021
Sailesh et al.	Sound absorption and transmission loss characteristics of 3D printed bio-degradable material with graded spherical perforations	2022

Fonte: Do autor (2024).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Vermiculita

O concentrado de Vermiculita natural (VN), proveniente da mineração de fosfato, foi fornecida em seu estado natural pela empresa *Brasil Minérios*, localizada em São Luiz de Montes Belos – Goiás, Brasil. Para a homogeneização da granulometria, o argilomineral foi peneirado, como apresentado na Figura 01. O material foi inserido em peneiras determinadas que, em seguida, foram afixadas a um vibrador de peneiras, durante 10 min. O material passante na peneira de 18 mesh e retido na de 35 mesh foi utilizado na pesquisa (-1 +0,5 mm). Os tamanhos das partículas foram definidos de acordo com Souza et al. (2016), que ao comparar os resultados das esfoliações térmicas em diferentes granulometrias, observou maiores esfoliações em maiores partículas. Além disso, este intervalo apresentou a maior quantidade de material (Tabela 06).

Figura 01 - Peneiramento do concentrado de Vermiculita natural: peneiras utilizadas, com o concentrado de Vermiculita (A); peneiras acopladas ao vibrador automatizado (B).

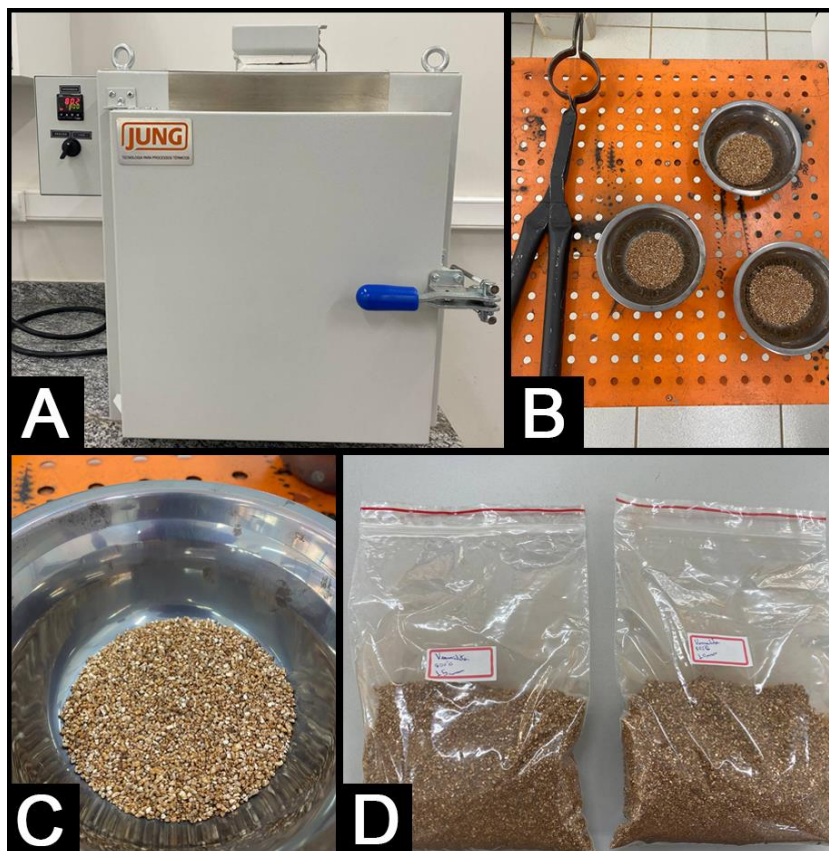


Fonte: Do autor (2023).

Buscando a otimização do processo de esfoliação térmica, foram realizados vários ensaios exploratórios, para definir o tempo e a temperatura mais adequada para os objetivos da pesquisa. Para esfoliar o material, foi inserido 10 g de VN por recipiente de aço inoxidável, com dimensões 12 x 8 x 4,5 cm (Diâmetro maior, diâmetro menor, altura), que em seguida foram alocados, com o auxílio de uma pinça de 70 cm de comprimento, dentro do forno mufla

pré-aquecido (modelo LF02312; Jung), com controle digital de temperatura e temporizador. Após o período definido, os recipientes foram imediatamente retirados e apoiados sobre uma mesa metálica, para descanso durante 10 min. Neste contexto, os tratamentos com temperatura de 800 °C e períodos de 10 e 15 min foram previamente selecionados para caracterização e posteriormente foi definido o tratamento para ser incorporado ao tijolo. A Figura 02 mostra os procedimentos realizados para o tratamento térmico.

Figura 02 - Esfoliação do concentrado de Vermiculita: forno utilizado (A); pinça utilizada e recipientes com o concentrado de Vermiculita esfoliado (B); recipiente com o concentrado Vermiculita esfoliada (C); armazenamento do concentrado Vermiculita esfoliada (D).



Fonte: Do autor (2023).

Após os tratamentos térmicos, foram realizados os ensaios de caracterização das amostras de concentrado de Vermiculita natural (VN) e concentrados de Vermiculita esfoliada (VE), de acordo com a Tabela 02.

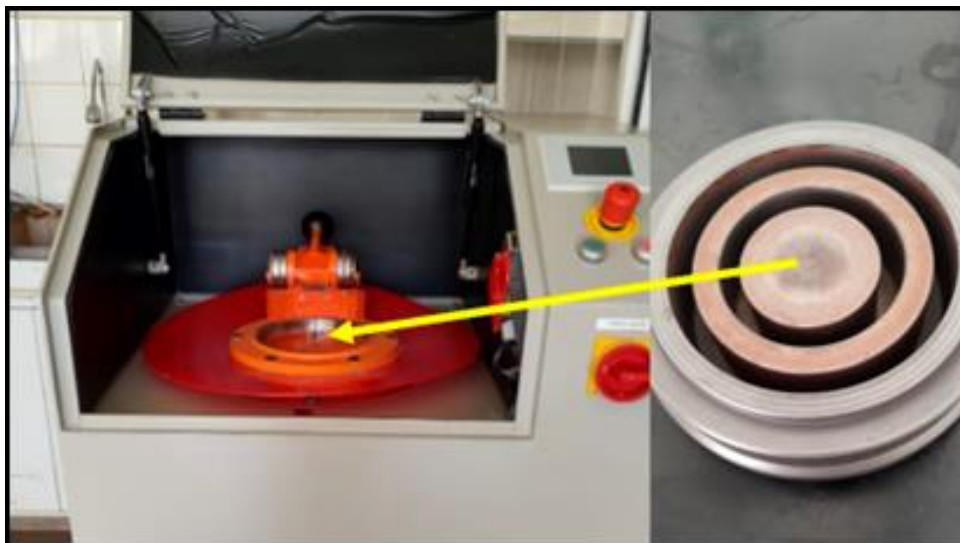
Tabela 02 - Caracterização dos concentrados de Vermiculita.

Ensaio	Metodologia	Finalidade
Análise morfológica	Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)	Análise do processo de esfoliação da Vermiculita
Análise tridimensional por imagens óticas	Estereomicroscópio	Visualizar possíveis contaminantes minerais junto as amostras
Análise física	Brasil Minérios (2023) Valdiviezo & Souza (2010) Área superficial (SBET)	Determinar a granulometria Determinar a densidade Determinar a área superficial
Análise dos grupos funcionais	Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)	Análise dos grupos funcionais orgânicos
Análise térmica	Termogravimetria (TGA)	Análise da perda de massa e reações exo/endotérmicas
Análise microestrutural	Difração de Raios-X (DRX)	Informações estruturais e de fases das amostras
Análise química	Florescência de Raios-X (FRX)	Determinar a composição e concentração de elementos óxidos presentes nas amostras

Fonte: Do autor (2023).

Para a realização dos ensaios de Fluorescência de Raios-X (FRX), Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR), Termogravimetria (TGA), Difração de Raios-X (DRX) e ensaio de Área Superficial (SBET), os concentrados de Vermiculita natural e esfoliados (VN, VE 800/10 e VE 800/15) foram pulverizados em um Moinho Pulverizador de Panela AMEF (Modelo AMP1-M), com controlador lógico programável. A Figura 03 mostra o moinho e o porta amostras.

Figura 03 - Moinho pulverizador de panela AMEF e porta amostra.



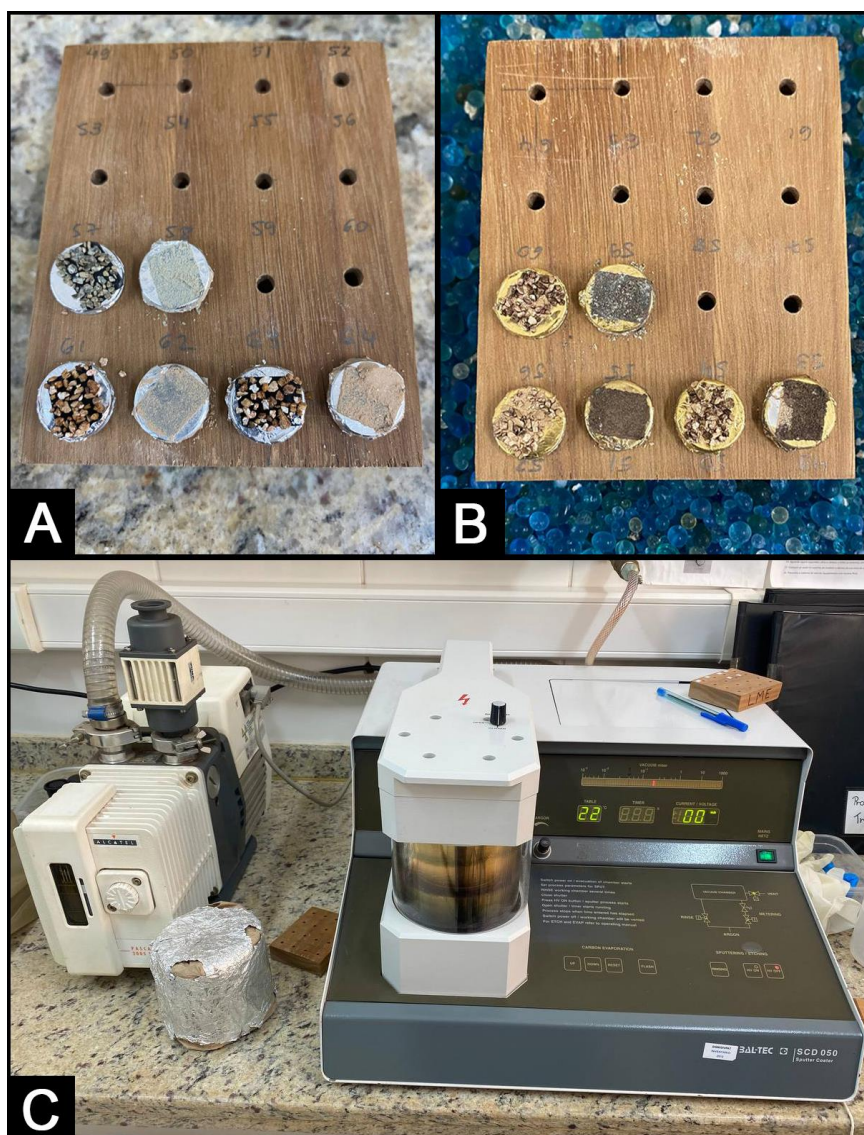
Fonte: Do autor (2023).

Para isso, as amostras foram inseridas no porta amostras com capacidade de 125 mL e cominuídas a uma velocidade de 1120 rpm, adquirindo granulometria final (retida) de 400 mesh, de acordo com a NR-10 (ABNT, 2004) e NR-12 (ABNT, 2019).

3.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

As amostras analisadas, por não conduzirem elétrons, necessitaram de preparo prévio com o banho de ouro, que proporcionou a condutibilidade elétrica ao material. Para o banho de ouro, as amostras VN e VE foram afixadas em *stubs* de alumínio, com fita dupla de carbono, posicionados sob porta amostra de madeira. O evaporador de ouro utilizado foi o SCD 050 (Bal-Tec). A Figura 04 mostra o preparo do material para a realização do MEV.

Figura 04 - Banho de ouro: material alocado sob porta amostra (A); material após o banho de ouro (B); evaporador de ouro (C).



Fonte: Do autor (2023).

O preparo da amostra e o ensaio do MEV foram realizados no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Análise Ultraestrutural da Universidade Federal de Lavras – UFLA. O aparelho utilizado na Microscopia Eletrônica de Varredura foi o STEM - FEG de ultra-alta resolução, livre de campo, modelo CLARA (TESCAN, 2021).

3.1.2 Estereomicroscópio

Para a realização do ensaio foi utilizado o equipamento Estereomicroscópio binocular Laborana com aumentos de 30x, mostrado na Figura 05.

Figura 05 - Estereomicroscópio.



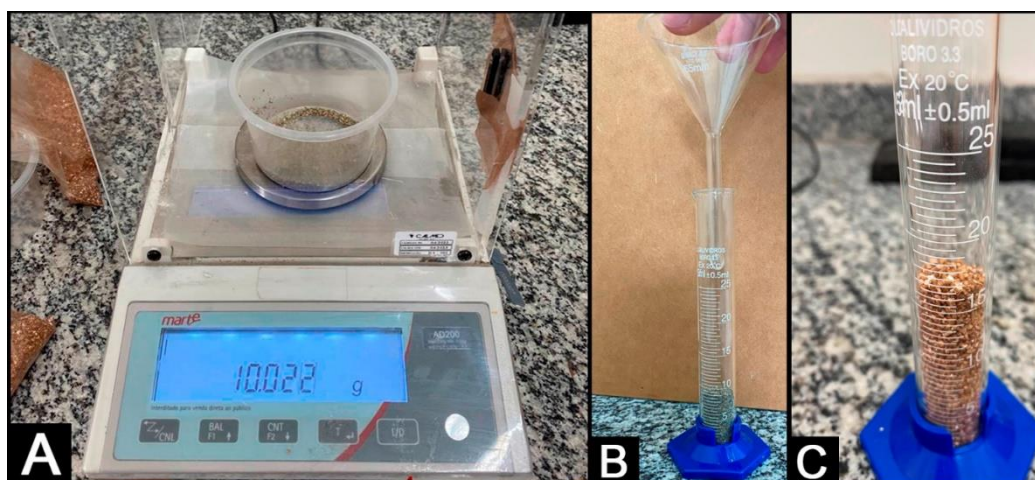
Fonte: Do autor (2023).

Para as análises superficiais de rochas e derivados o estereomicroscópio é mais indicado, quando comparado ao microscópio de luz. O ensaio foi realizado no Laboratório de Mineralogia e Petrografia do CEFET – MG, em Araxá.

3.1.3 Densidades

A metodologia descrita por Valdiviezo & Souza (2010) foi utilizada para determinar a densidade aparente. Para isso utilizou-se 5 g do material em uma balança de precisão de 0,01 g. Em seguida, as amostras foram inseridas em uma proveta de 25 mL, onde o volume do material foi medido. Foram realizadas 5 repetições por tratamento. A Figura 06 apresenta as etapas do ensaio de densidade aparente.

Figura 06 - Ensaio de densidade aparente: material sendo pesado na balança de precisão (A); material sendo transferido para a proveta graduada (B); determinação do volume (C).



Fonte: Do autor (2023).

Por fim, as densidades aparentes foram calculadas através da Equação 01:

$$D = \frac{M}{V} \quad (01)$$

Onde:

D: Densidade aparente (g/mL);

M: Massa (g);

V: Volume (mL).

O ensaio de densidade real foi realizado no picnômetro a gás, mostrado na Figura 07.

Figura 07 - Picnômetro a gás.



Fonte: Do autor (2023).

Para determinação da densidade real foi utilizado um picnômetro a gás (modelo Autodensity 100 microprocessado; ACP Instruments), em ambiente controlado a $23\text{ °C} \pm 10\%$ e U.R. máx 70 %, junto ao Laboratório de Tratamento de Minérios do CEFET-MG em Araxá. Foram realizadas 5 repetições por tratamento.

3.1.4 Área Superficial Específica (SBET)

A área de superfície específica foi obtida a partir de isotermas de N_2 à 77 K, utilizando o equipamento Quantachrome NovaWin (NOVA instruments, versão 11.03). Amostras de, aproximadamente 200 mg, foram desgaseificadas durante 2 h a 105 °C. Em seguida, N_2 foi empregado como adsorbato a uma pressão relativa de 0,025 a 0,30. O cálculo da área de superfície específica, volume médio total de poros e tamanho médio das amostras foram realizados usando o modelo de Brunauer–Emmette-Teller (BET) e (BJH) Barrett-Joyner-Helenda, respectivamente (Santilli & Pulcinelli, 1993). Este ensaio foi realizado no Laboratório de Caracterização de Materiais, do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET – MG, em Belo Horizonte.

3.1.5 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

As análises das amostras VN e VE foram realizadas no espectrômetro FT-IR Varian 600-IR com transformada de Fourier, com o acessório GladiART da Pike Technologies acoplado para medidas por reflectância total atenuada (ATR) a 45° com cristal de seleneto de zinco. A faixa espectral analisada foi de 400 a 4.000 cm^{-1} , resolução de 2 cm^{-1} e 64 varreduras. Este ensaio foi realizado na Central de Análises e Prospecção Química na Universidade Federal de Lavras – UFLA.

3.1.6 Termogravimetria (TGA)

Para a realização do ensaio, foram utilizados os seguintes equipamentos: balança, forno, suporte de amostra e sensor de temperatura e programador de temperatura do forno (DTG-60A/60AH – n° série: C30594500039), sistema registrador (TA-60WS – n° série: C30704500986LP) e controlador de fluxo e atmosfera do forno (FC-60A – n° série: C30544500954). Foram utilizados aproximadamente 7 mg do material para a análise. Este foi submetido a uma rampa de temperatura de 30 °C a 900 °C, com uma taxa de aquecimento de

10 °C/min, sob atmosfera de N₂, de vazão de 50 mL/min. Este ensaio foi realizado na Central de Análises e Prospecção Química na Universidade Federal de Lavras – UFLA.

3.1.7 Difração de Raios-X (DRX)

O ensaio foi realizado no Difratorômetro Rigaku e no microcomputador, utilizado para capturar e tratar as imagens, apresentados pela Figura 08.

Figura 08 - Difratorômetro de Raios-X e microcomputador.



Fonte: Do autor (2023).

As análises da Difração de Raios-X (DRX) das amostras de VN, VE 800/10 e VE 800/15, foram realizadas no Laboratório de Engenharia Química do Departamento de Engenharia Rural da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, em um difratorômetro (Rigaku Miniflex 600, tensão de 40 kV e corrente: 15 mA) com intervalo (2θ) de 3 a 80°, em modo step scan, com passo de 0,02 e duração de 0,5°/min. A granulometria (retida) utilizada no ensaio foi de 400 mesh.

3.1.8 Fluorescência de Raios-X (FRX)

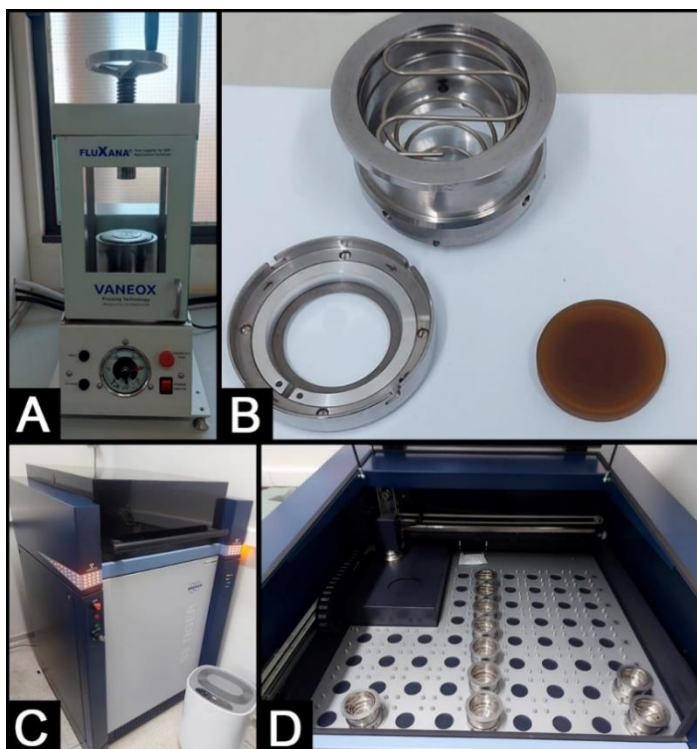
O ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX) foi realizado no Laboratório de Ciências do Solo da Universidade Federal de Lavras – UFLA e a metodologia utilizada no ensaio foi descrita por Ramalho et al. (2020), com algumas alterações. O espectrômetro utilizado para

determinar e quantificar os elementos minerais presentes nas amostras foi o S8 Tiger (modelo S8 Tiger, Kennewick, WA, EUA), com dispersão de comprimento de onda (WDXRF).

Foram separados em torno de 8 g de material por amostra, para a realização dos ensaios. Com uma prensa automática (modelo Vaneox – Fluxana), foram aplicadas 25 ton/cm² nas amostras, obtendo-se as pastilhas planas prensadas com 3,4 cm de diâmetro. Caso necessário, por falta de material, as pastilhas podem ser compostas por uma mistura de 4,5 g do material e 3,5 g de um micro pó de cera Hoechst C (Merck - C₃₈H₇₆N₂O₂).

Em seguida, todo o comprimento da superfície da amostra foi analisado por varredura pelo espectrômetro WDXRF (modelo S8 Tiger 4kW, Bruker). Este foi equipado com um tubo de raios-X (60 kV máximo) com janela Be de 75 µm; cristais do analisador (LiF200, LiF220, PET, XS-55 e XS-C): 20-60kV, 5-170 mA, potência de excitação de 4 kW; dois detectores (contador de fluxo e cintilação); dois filtros (Al e Cu), dois colimadores (0,23 e 0,46°); e uma máscara de feixe (34 mm). A caixa para carregamento automático tem capacidade para 60 amostras. As análises foram conduzidas usando o método Bruker Quant Express. A Figura 09 mostra o ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX).

Figura 09 - Ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX): prensa automática (A); pastilhas (B); espectrômetro (C); caixa para carregamento automático (D).



Fonte: Do autor (2023).

Após a obtenção dos elementos químicos (base elementar) presentes nas amostras, realizou-se a conversão destes em bases de óxidos. Os cálculos foram realizados pela Equação 02:

$$x = \frac{M_m}{Q_{eo} \times M_a} \times Q_{em} \quad (02)$$

Onde:

X: Quantidade do óxido do elemento presente no material (%);

M_m: Massa molar do óxido a ser encontrado (g/mol);

Q_{eo}: Quantidade do elemento presente na forma de óxido;

M_a: Massa atômica do elemento (u);

Q_{em}: Quantidade do elemento presente no material, encontrado no ensaio FRX.

3.1.9 Esfoliação

Por fim, após os ensaios preliminares, realizou-se a análise dos dados e foi determinado o tratamento com a temperatura e tempo mais eficiente para a esfoliação do concentrado de Vermiculita. Em seguida, foram preparadas maiores quantidades do VE, com o tratamento selecionado, para a confecção dos corpos de prova.

3.2 Solo

O solo utilizado na pesquisa foi coletado na Universidade Federal de Lavras - UFLA, nas coordenadas 21° 13' 51.4" Sul, 44° 59' 06.9" Oeste, em Lavras – Minas Gerais, Brasil. O solo foi peneirado para se adequar a granulometria e eliminar possíveis materiais que pudessem interferir na moldagem dos tijolos, conforme preconiza a NBR 10833 (ABNT, 2012).

Para a produção do tijolo de solo-cimento com maior durabilidade, o solo deve apresentar um teor de areia entre 50 % e 90 %, de acordo com o ET - 35 (ABCP, 1986). Para isso, o solo deve ser classificado e, se necessário, corrigido. Neste contexto, o solo foi caracterizado em conformidade com as metodologias descritas na Tabela 03.

Tabela 03 - Caracterização do solo.

Ensaio	Metodologia	Finalidade
Granulometria	NBR 7181 (ABNT, 2016)	Determinar a textura do solo
Umidade	NBR 6457 (ABNT, 2016)	Determinar o teor de umidade do solo
Análise microestrutural	Difração de Raios-X (DRX)	Informações estruturais e das fases das amostras
Análise química	EMBRAPA (BRASIL, 1997)	Determinar o pH do solo
Análise morfológica	Florescência de Raios-X (FRX)	Determinar a composição e concentração de elementos presente nas amostras
Limite de Liquidez	NBR 6459 (ABNT, 2016)	Determinar os limites de consistência do solo
Limite de Plasticidade	NBR 7180 (ABNT, 2016)	
Compactação (Proctor normal)	NBR 12023 (ABNT, 2012)	Determinar a massa específica aparente máxima e o teor de umidade ótimo

Fonte: Do autor (2023).

Para a realização dos ensaios de Difração de Raios-X (DRX) e Fluorescência de Raios-X (FRX) o solo foi pulverizado em um Moinho Pulverizador de Panela AMEF (Modelo AMP1-M), com controlador lógico programável. Para isso, as amostras foram inseridas no porta amostras com capacidade de 125 mL e cominuídas a uma velocidade de 1120 rpm, adquirindo granulometria final (retida) de 400 mesh, de acordo com a NR-10 (ABNT, 2004) e NR-12 (ABNT, 2019).

3.2.1 Umidade

O teor de umidade do solo foi determinado através da Equação 03:

$$w = \frac{m_1 - m_2}{m_2 - m_3} \times 100 \quad (03)$$

Onde:

w: Teor de umidade da amostra compactada (%);

m₁: Massa do recipiente + Amostra úmida (g);

m₂: Massa do recipiente + Amostra seca (g);

m_3 : Massa do recipiente (g).

3.2.2 Difração de Raios-X (DRX)

O ensaio de Difração de Raios-X (DRX) para o solo foi executado de acordo com as metodologias descritas no item 3.1.7.

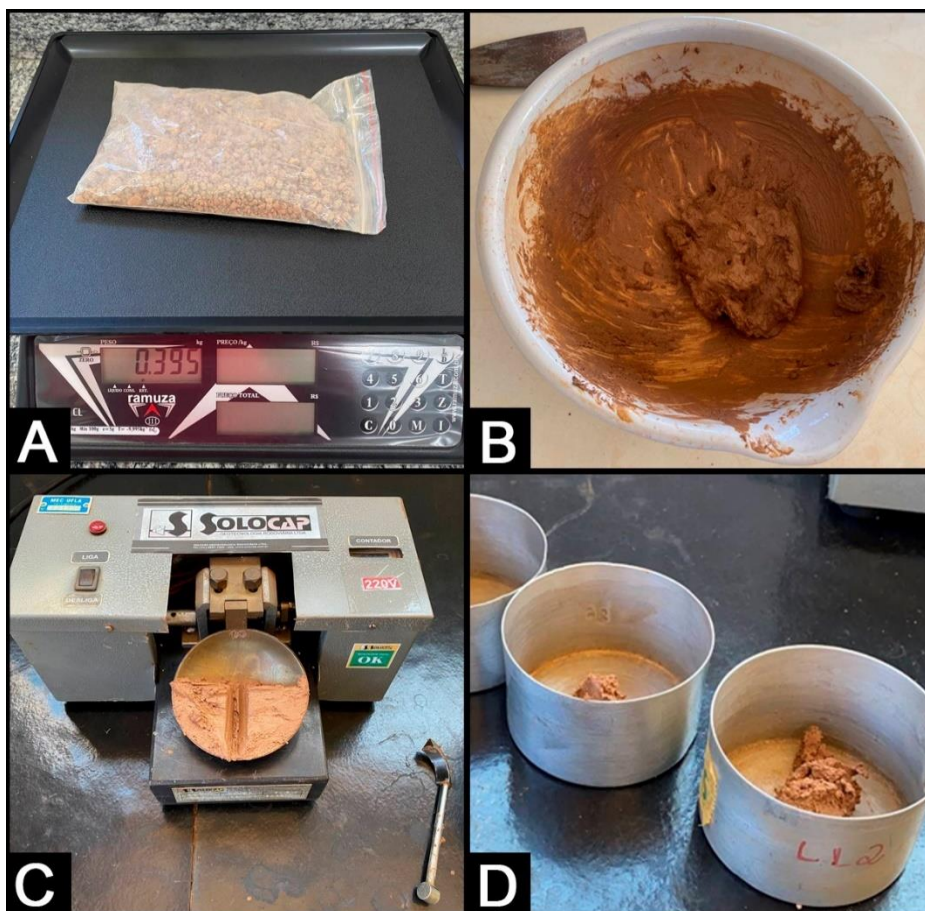
3.2.3 Fluorescência de Raios-X (FRX)

O ensaio de Fluorescência de Raios-X (FRX) para o solo foi executado de acordo com as metodologias descritas no item 3.1.8.

3.2.4 Limites de consistência

Os Limites de consistência do solo foram determinados através do ensaio realizado no aparelho Casagrande automatizado (modelo CA2R; Solocap geotecnologia rodoviária LTDA.), exibido pela Figura 10.

Figura 10 - Ensaio dos Limites de consistência: pesagem do solo (A); mistura do solo com água destilada (B); realização do ensaio no aparelho Casagrande (C); retirada de pequenas amostras, posteriormente enviadas à estufa (D).



Fonte: Do autor (2023).

Este ensaio foi realizado no Laboratório de Geotecnia do departamento de Ambiental e Resíduos Sólidos na Universidade Federal de Lavras – UFLA. Observando o gráfico desenvolvido (Figura 28), o valor do Limite de Liquidez (LL) é a umidade do ponto de encontro de 25 golpes com a curva do ensaio. O Limite de Plasticidade (LP) foi definido pelo valor médio de água (umidade) utilizado nas amostras para realização dos ensaios. Em seguida, o Índice de plasticidade (IP) do solo foi calculado através da Equação 04:

$$IP = LL - LP \quad (04)$$

Onde:

LL: Limite de liquidez;

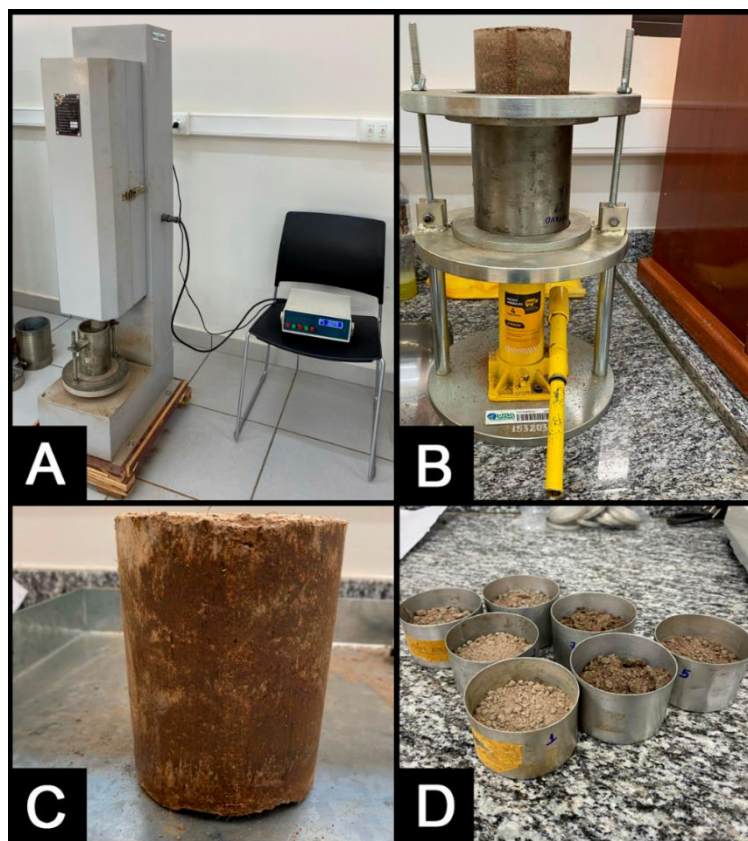
LP: Limite de plasticidade;

IP: Índice de plasticidade.

3.2.5 Compactação

O ensaio de compactação foi realizado no Laboratório de Geotecnia do departamento da Engenharia Civil na Universidade Federal de Lavras – UFLA. Para a realização do ensaio foram encontrados 9 pontos de compactação por tratamento. O maquinário utilizado foi um compactador automatizado (modelo LR-T0131; Aixipu Instrument Co. Ltd.). As matérias primas foram pesadas e misturadas, adicionando também a água. Em seguida ficaram em repouso em sacos plásticos vedados, por aproximadamente 24 horas, para homogeneização da mistura. Após este período, o cimento foi adicionado a mistura e foi realizado o ensaio de compactação, como apresentado pela Figura 11.

Figura 11 - Ensaio de compactação: compactador automatizado (A); retirada da amostra do cilindro metálico (B); amostra compactada (C); retirada de pequenas porções do centro da amostra para serem levadas a estufa (D).



Fonte: Do autor (2023).

A massa específica aparente seca foi calculada através das Equações 05 e 06:

$$\rho = \frac{M}{V} \quad (05)$$

$$\rho_d = \frac{\rho}{w + 100} \times 100 \quad (06)$$

Onde:

ρ : Massa específica (g/cm³);

ρ_d : Massa específica aparente seca (g/cm³);

M: Massa (g);

V: Volume (cm³);

w: Teor de umidade da amostra compactada (%).

O grau de compactação foi calculado através da Equação 07:

$$GC = \frac{\rho_d}{\rho_{d\text{máx}}} \quad (07)$$

Onde:

GC: Grau de compactação;

ρ_d : Massa específica aparente seca (g/cm³);

$\rho_{d\text{máx}}$: Massa específica aparente seca máxima (g/cm³).

3.3 Cimento

O cimento utilizado foi o CPII-E-32 (Cimento Portland composto com adição de escória), por apresentar as propriedades ligantes, aglomerantes e aglutinantes satisfatórias e por ser amplamente utilizado na região. Os sacos de cimento foram adquiridos juntos a uma casa de materiais de construção, localizada em Lavras – Minas Gerais, Brasil.

A definição do teor de cimento utilizado para a estabilização dos tijolos maciços de solo-cimento seguiu as recomendações preconizadas pela *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO, 2017) para solos, e pelo ET - 35 (ABCP, 1986).

3.4 Tijolos maciços de solo-cimento (TMSC)

A produção dos corpos de prova foi realizada no Centro de Inovações em Materiais Sustentáveis – CIMS na Universidade Federal de Lavras – UFLA. Foram utilizados três tratamentos para a confecção dos corpos de prova dos tijolos maciços de solo-cimento maciços (TMSC), como mostrado na Tabela 04. Os corpos de prova substituem, em volume, o solo por concentrado de Vermiculita esfoliada nas proporções de 0, 2,5 e 5 %. A definição da quantidade do argilomineral a ser incorporado foi definida de acordo com o trabalho de Ribeiro (2020), que ao utilizar 1,5 e 3,0 % de Vermiculita esfoliada obteve resultados satisfatórios. Buscando a excelência, o trabalho propôs expandir as proporções para os valores supracitados.

Tabela 04 - Tijolos maciços de solo-cimento - Tratamentos.

Tratamentos	VE 800/15 (%)	Cimento (%)	Solo (%)
T1 – Amostra padrão	0,00	12,00	88,00
T2	2,50	12,00	85,50
T3	5,00	12,00	83,00

Fonte: Do autor (2023).

Para cada tratamento foram preparados 20 corpos de prova, totalizando 60, como apresentado pela Tabela 05.

Tabela 05 - Quantidade de corpos de prova por ensaio.

Ensaio	Corpos de prova por tratamento	
	Antes de envelhecer	Após envelhecer
Absorção de água	3*	3*
Resistência à compressão	7	7
Isolamento acústico	3*	3*
Isolamento térmico	3*	3*
Durabilidade	3*	3*

Fonte: Do autor (2023).

Nota: Os 3* corpos de prova foram reutilizados para os ensaios de absorção de água, isolamento acústico e isolamento térmico. O ensaio de durabilidade utilizou 3 corpos de prova aleatórios, que posteriormente foram reutilizados. Isso foi possível pois os ensaios não são destrutivos.

A Figura 12 apresenta as etapas de produção dos tijolos maciços de solo-cimento.

Figura 12 - Produção dos tijolos maciços de solo-cimento: materiais separados e ensacados (A); tijolo produzido (B e C); tijolos alocados sob uma lona, para realização da cura durante 28 dias (D).



Fonte: Do autor (2023).

Durante a produção, os materiais foram pesados e misturados manualmente, seguido da adição gradativa de água, para sua homogeneização. A quantidade de água utilizada foi a umidade ótima, encontrada no ensaio de compactação. A mistura foi inserida na prensa hidráulica automática, com motor de 7,5 cv, (Verde equipamentos[®]) para moldagem do compósito. Estes foram fabricados nas dimensões 25 x 12,5 x 5,5 cm (comprimento, largura e altura), em concordância com as condições dispostas na NBR 8491 (ABNT, 2012). Posteriormente, os corpos de prova foram alocados em uma superfície plana e umidificados com intervalos de 24 h, por um borrifador de água, durante 7 dias, para garantir sua cura. Após 28 dias da moldagem, os corpos de prova de tijolo de solo-cimento foram caracterizados em conformidade com as metodologias descritas na Tabela 06.

Tabela 06 - Caracterização dos tijolos maciços de solo-cimento.

Ensaio	Metodologia	Finalidade
Absorção de água	NBR 8492 (ABNT, 2012)	Determinar a absorção de água do tijolo de solo-cimento
Resistência à compressão		Determinar a resistência mecânica
Isolamento Térmico	Vilela et al. (2020)	Determinar a condutividade térmica
Isolamento Acústico	Pereira (2020)	Determinar as propriedades acústicas
Durabilidade	NBR 13554 (ABNT, 2012)	Determinar a durabilidade baseado no envelhecimento acelerado

Fonte: Do autor (2023).

3.4.1 Absorção de água

O ensaio de Absorção de água foi realizado no Centro de Inovações em Materiais Sustentáveis – CIMS na Universidade Federal de Lavras – UFLA. Seguindo as determinações da NBR 8492 (ABNT, 2012), foram utilizados 3 corpos de prova por tratamento, estes foram reutilizados para o ensaio de isolamento térmico e isolamento acústico. Após o envelhecimento dos tijolos, o ensaio foi realizado novamente, utilizando outros 3 corpos de prova, totalizando 6. Este parâmetro foi calculado através da Equação 08:

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (08)$$

Onde:

A: Absorção de água (%);

m₁: Massa do corpo de prova seco em estufa (g);

m₂: Massa do corpo de prova saturado (g).

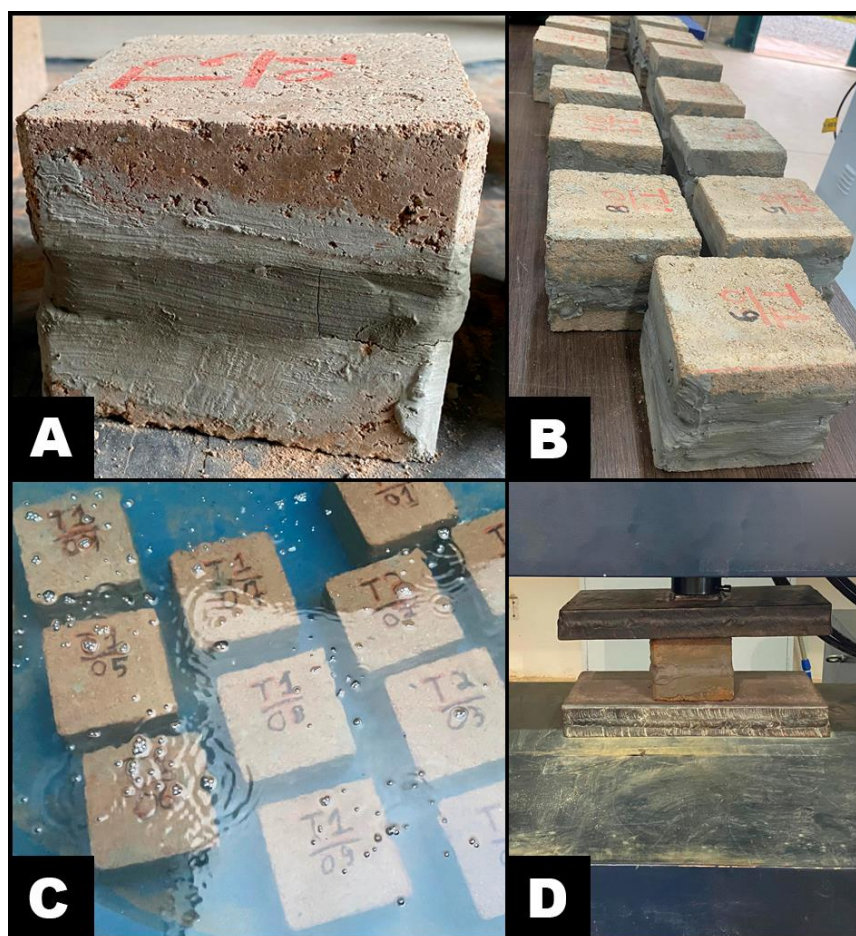
3.4.2 Resistência à compressão

O ensaio de resistência à compressão foi realizado no Galpão de Estruturas do departamento de Engenharia Civil na Universidade Federal de Lavras – UFLA. Seguindo as orientações da NBR 8492 (ABNT, 2012), foram utilizados 7 corpos de prova por tratamento para a realização do ensaio de resistência à compressão simples. Após o ensaio de

durabilidade, o ensaio foi realizado novamente, utilizando mais 7 corpos de prova, totalizando 14. Os corpos de prova foram cortados ao meio, com o auxílio de uma maquina com serra cerâmica, em sua maior dimensão (comprimento). Em seguida, as partes cortadas do tijolo foram sobrepostas e suas medidas foram definidas.

Para a junção/fixação das partes do tijolo, utilizou-se uma pasta de cimento com proporção de 1:0,33 g de cimento/água. A pasta também auxiliou na regularização das faces do tijolo, tornando-as planas e perpendiculares. Após o endurecimento da pasta, os corpos de prova foram submersos em água durante 6 h e posteriormente foram ensaiados. A carga foi aplicada uniformemente em uma razão de 500 N/s. A Figura 13 apresenta a preparação dos corpos de prova e execução do ensaio de resistência à compressão.

Figura 13 - Preparo e realização do ensaio de resistência à compressão: TMSC cortado e fixado com a pasta de cimento (A); corpos de provas prontos (B); imersão dos corpos de prova em água (C); ensaio de resistência à compressão (D).



Fonte: Do autor (2023).

A resistência a compressão simples foi calculada através da Equação 09:

$$F_t = \frac{F}{S} \quad (09)$$

Onde:

F_t : Resistência à compressão simples (MPa);

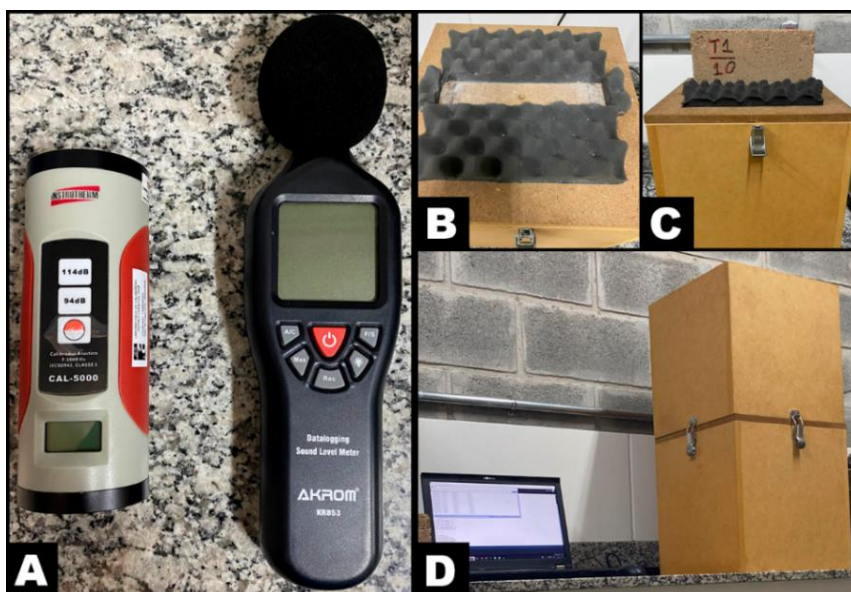
F: Carga de ruptura do corpo de prova (N);

S: Área de aplicação da carga (mm²).

3.4.3 Isolamento acústico

O ensaio de isolamento acústico foi realizado no Centro de Inovações em Materiais Sustentáveis – CIMS na Universidade Federal de Lavras – UFLA. Foram utilizados 3 corpos de prova por tratamento, estes foram reutilizados para o ensaio de isolamento térmico e absorção de água. Após o envelhecimento dos tijolos, o ensaio foi realizado novamente, utilizando outros 3 corpos de prova, totalizando 6. O equipamento utilizado foi desenvolvido por pesquisadores do departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras, seguindo as recomendações de Pereira (2020). A Figura 14 apresenta o equipamento utilizado para o ensaio de isolamento acústico.

Figura 14 - Ensaio de isolamento acústico: transdutor emissor e receptor (A); local de posicionamento da amostra (B); amostra posicionada (C); equipamento fechado e em funcionamento (D).



Fonte: Do autor (2023).

O aparelho é formado por duas caixas de madeira sobrepostas revestidas com placas de isopor de 15 mm e manta de espuma acústica de 30 mm. Um transdutor emissor de som (Modelo CAL-5000; Instrutherm) calibrado em 94 db, posicionado na caixa superior, a 5 cm da amostra, bem como um transdutor captador de som (Modelo KR853; Akrom[®]), posicionado na parte inferior, a 1 cm da amostra, foram inseridos e corretamente posicionados. O ensaio foi realizado durante um período de aproximadamente 200 segundos, sendo os primeiros 60, descartados. A partir deste ensaio foi possível calcular a barreira acústica do tijolo de solo-cimento, através da Equação 10:

$$BA = 94 - x \quad (10)$$

Onde:

BA: Barreira acústica (dB);

94: Valor do calibrador acústico (dB);

x: Valor resultante em cada ensaio (dB).

3.4.4 Isolamento térmico

O ensaio de isolamento térmico foi realizado no Centro de Inovações em Materiais Sustentáveis – CIMS na Universidade Federal de Lavras – UFLA. Foram utilizados 3 corpos de prova, que posteriormente foram reutilizados nos ensaios de isolamento acústico e absorção de água. Após o envelhecimento dos tijolos, o ensaio foi realizado novamente, utilizando outros 3 corpos de prova, totalizando 6. Seguindo as recomendações de Vilela et al. (2020), o ensaio foi realizado em uma câmara produzida com painéis de partículas de média densidade (MDP) e revestimento, utilizando uma lâmpada incandescente, alocada na parte inferior, com emissão de calor constante, a uma temperatura 323,15 K. Na parte superior utilizou-se uma placa de isopor, com uma abertura centralizada, no qual as amostras (tijolos) foram inseridas. O calor passante foi detectado através sensores (fixados na parte superior e inferior do tijolo). Por fim, a câmara foi fechada, isolando o sistema. O ambiente foi climatizado através de ar-condicionado em uma temperatura de 298,15 K. O tempo para a estabilização de temperatura da amostragem foi de 13 h. A Figura 15 mostra a realização do ensaio térmico.

Figura 15 - Ensaio de isolamento térmico; corpo de prova posicionado na placa de isopor, com os sensores de calor fixados (A); equipamento fechado e em funcionamento (B).



Fonte: Do autor (2023).

A determinação da condutividade térmica que atravessa os tijolos foi obtida através da Equação 11:

$$K = \frac{P \times E}{\Delta T} \quad (11)$$

Onde:

K: Condutividade térmica (W/m.K);

P: Radiação da lâmpada incandescente (W/m²);

E: Espessura da amostra (m);

ΔT : Diferença de temperatura para a estabilização (K).

3.4.5 Durabilidade

O ensaio de durabilidade, ou envelhecimento acelerado, foi realizado no Centro de Inovações em Materiais Sustentáveis – CIMS na Universidade Federal de Lavras – UFLA. Seguindo as orientações da NBR 13554 (ABNT, 2012), foram utilizados 3 corpos de prova por tratamento para a realização do ensaio, além de uma estufa (modelo SL-102; Solab) e um reservatório de 500 L. O ensaio consiste na execução de 6 ciclos, sendo determinados os volumes e massas dos tijolos após cada etapa realizada. O ciclo consistiu na imersão dos corpos de prova em água, durante 5 h, e em seguida foram retirados e levados a estufa, durante 42 h a uma temperatura de $(71 \pm 2) ^\circ\text{C}$. Após este período, os corpos de prova foram

retirados da estufa e sua superfície foi escovada (este processo deve durar no máximo 1 h, finalizando o ciclo, portanto, em 48 h). Estes procedimentos foram efetuados por mais 5 vezes.

A partir do ensaio, foi possível calcular a variação de volume, variação de umidade e perda de massa, através das Equações 12, 13 e 14, respectivamente.

$$Vv, n = \frac{(V_i - V_n)}{V_i} \times 100 \quad (12)$$

Onde:

$V_{v,n}$: Variação de volume do corpo de prova em cada etapa (%);

V_i : Volume inicial do corpo de prova (cm^3);

V_n : Volume do corpo de prova em cada etapa (cm^3).

$$Vh, n = \frac{(h_i - h_n)}{h_i} \times 100 \quad (13)$$

Onde:

$V_{h,n}$: Variação de umidade do corpo de prova em cada etapa (%);

h_i : Umidade inicial do corpo de prova (%);

h_n : Umidade do corpo de prova em cada etapa (%).

$$A = \frac{(m_{f(1)} - m_{i(1)})}{m_{i(1)}} \times 100 \quad (14)$$

Onde:

A: Água retida no corpo de prova (%);

$m_{f(1)}$: Massa seca final do corpo de prova após atingir massa constante (g);

$m_{i(1)}$: Massa seca inicial calculada, por ocasião da moldagem do corpo de prova (g).

3.5 Análise estatística dos dados

Para avaliação dos resultados obtidos nos ensaios de absorção de água, resistência à compressão, isolamento acústico e térmico, foram realizadas as análises estatísticas no software SISVAR 5.6. Os dados foram analisados em um delineamento inteiramente casualizado, sendo realizado análise de variância e teste de média Scott-knott, ambos a 5 % de significância.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

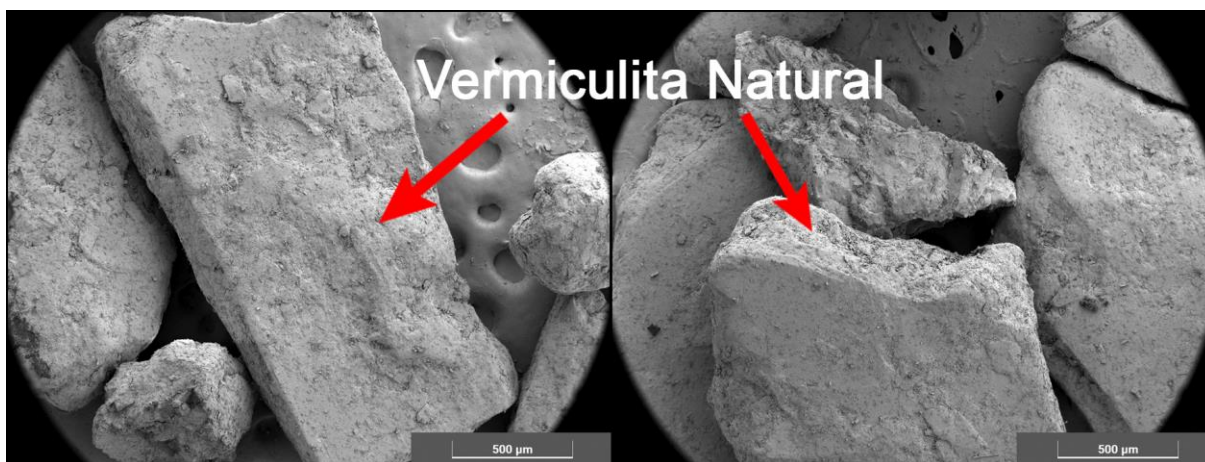
4.1 Vermiculita

4.1.1 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foi realizada para as amostras VN, VE 800/10 e VE 800/15 e não foi utilizado nenhum tipo de filtro nas figuras.

A Figura 16 apresenta as imagens do VN. Observa-se que as amostras não apresentaram fendas ou “aberturas” entre suas paredes.

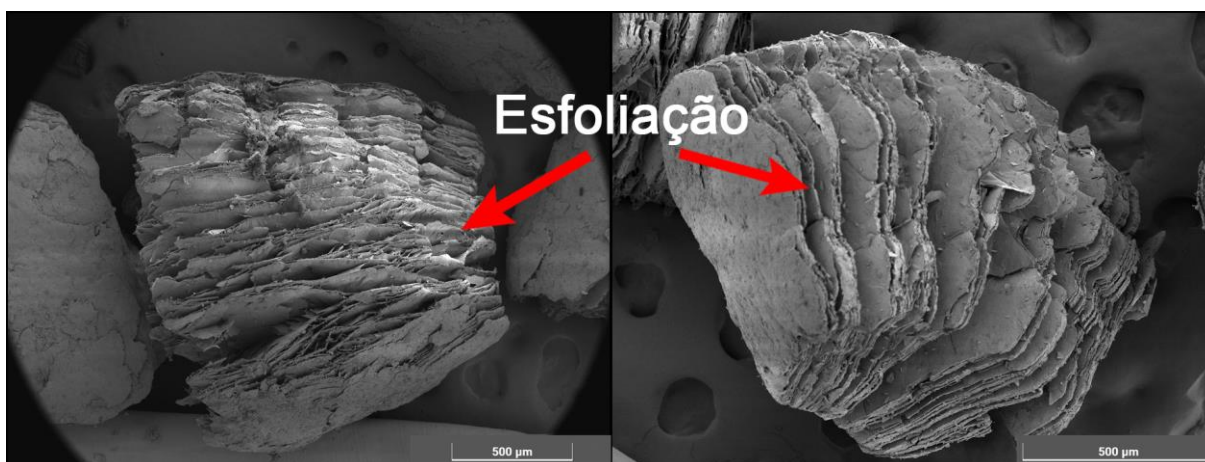
Figura 16 - Microscopia Eletrônica de Varredura do VN.



Fonte: Do autor (2023).

A Figura 17 apresenta imagens do VE 800/10. Observa-se a formação de grandes aberturas ou fendas, com grandes espaços vazios, entre suas paredes.

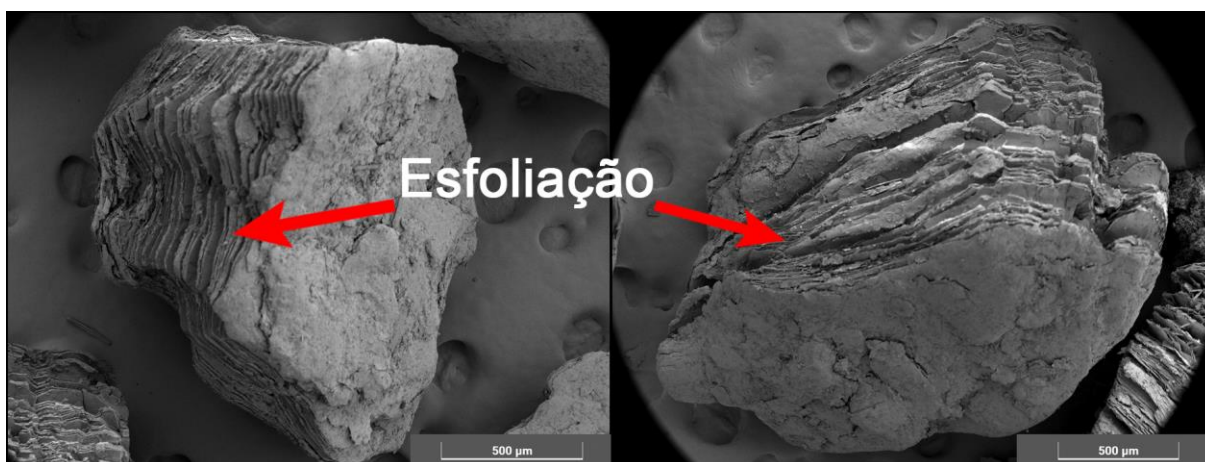
Figura 17 - Microscopia Eletrônica de Varredura do VE 800/10.



Fonte: Do autor (2023).

A Figura 18 exibe as imagens do VE 800/15. Da mesma forma, pode-se observar a formação de grandes aberturas/fendas, com espaços vazios, entre suas paredes, resultados do processo de esfoliação.

Figura 18 - Microscopia Eletrônica de Varredura do VE 800/15.



Fonte: Do autor (2023).

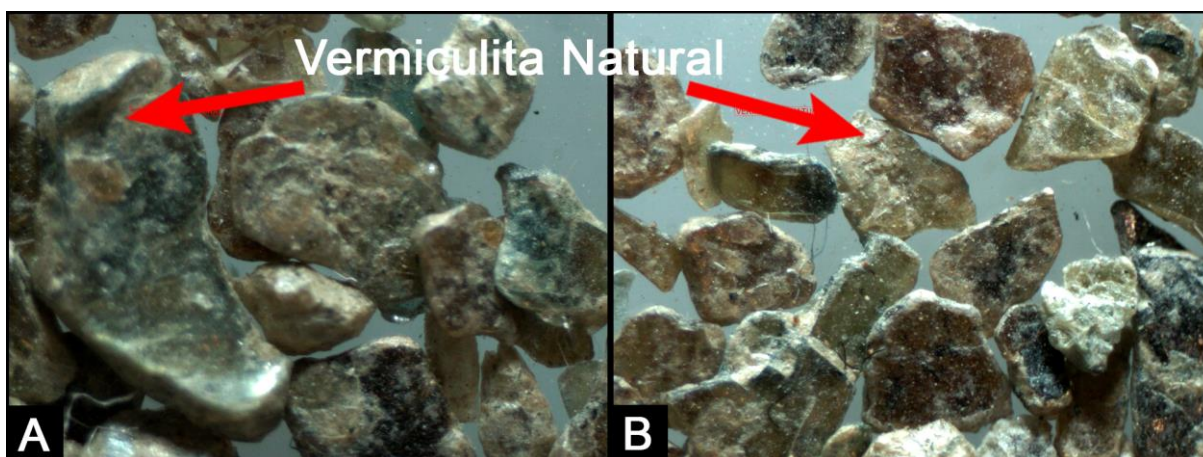
Ao comparar o MEV realizado nas três amostras, observa-se que o tratamento térmico foi efetivo e expandiu os concentrados de Vermiculita, entretanto, a diferença entre os tratamentos esfoliados, com períodos de 10 e 15 min, aparentemente não foram expressivas. Portanto, os resultados encontrados neste ensaio não justificam o gasto extra de energia para a esfoliação de 15 minutos. No entanto, as análises de outros ensaios são fundamentais para sustentar, ou contrariar, esta afirmação. Um ponto importante a ser considerado é que estas análises morfológicas, na maioria das vezes, não levam em consideração a quantidade e

qualidade das amostras em relação a população total, tendo um viés mais interpretativo, portanto, mais subjetivo, em relação a outros ensaios com viés mais quantitativos.

4.1.2 Estereomicroscopia

A Figura 19 apresenta as imagens do VN. Observa-se que o material é compacto e aparentemente não apresenta grandes espaçamentos entre suas camadas. Além disso, apresentam-se livres de quaisquer outros contaminantes.

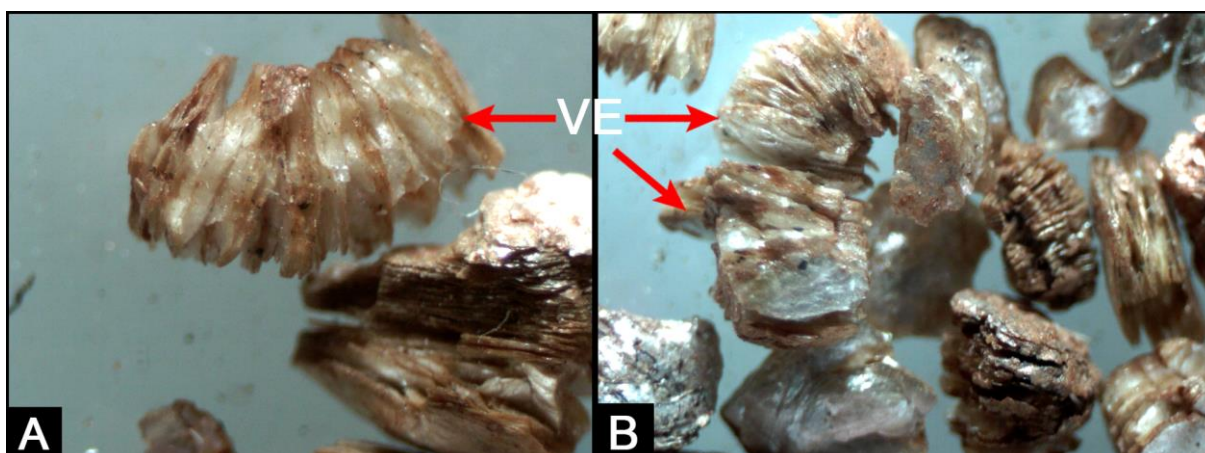
Figura 19 - Micrografia do VN.



Fonte: Do autor (2023).

A Figura 20 mostra o VE 800/10. Observa-se que o tratamento de esfoliação foi efetivo, promovendo a expansão do material, com grandes aberturas/fendas e maiores espaçamento entre camadas, quando comparadas ao VN.

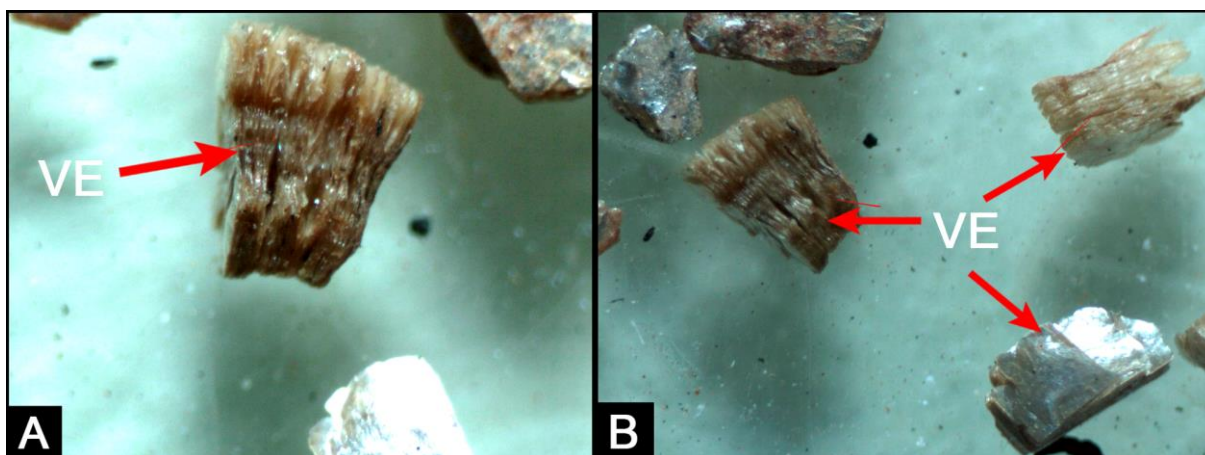
Figura 20 - Micrografia do VE 800/10.



Fonte: Do autor (2023).

A Figura 21 mostra o VE 800/15. Nota-se que o material expandiu e apresenta maiores espaçamentos entre suas camadas, quando comparadas a VN. No entanto, aparentemente, o tratamento VE 800/10 apresentou maior expansão, quando comparado ao VE 800/15.

Figura 21 - Micrografia do VE 800/15.



Fonte: Do autor (2023).

Ao comparar os resultados do ensaio, observa-se que ambos os tratamentos térmicos promoveram a esfoliação, no entanto, aparentemente o VE 800/10 foi mais efetivo. A discussão apresentada na MEV também vale para este ensaio, não sendo possível, portanto, decidir qual o tratamento mais efetivo sem antes levar em consideração os resultados dos ensaios quantitativos.

4.1.3 Granulometria

A granulometria do concentrado de Vermiculita natural (VN) foi fornecida pela empresa Brasil minérios (2023), descrita na Tabela 07.

Tabela 07 - Granulometria do concentrado de Vermiculita natural.

Peneiras (mm)	Retido	
	Simples (%)	Acumulado (%)
8,00	0,00	0,00
4,00	0,00	0,00
2,00	0,00	0,00
1,00	16,12	16,12
0,50	71,62	87,74
0,30	11,02	98,76
<0,30	1,25	100,00

Fonte: Brasil Minérios (2023).

Observa-se a predominância de material retido nas peneiras de 1,00 mm (16,12 %), 0,50 mm (71,62 %) e 0,30 mm (11,02 %), podendo ser classificado como concentrado de Vermiculita superfino, de acordo com a Empresa fornecedora da amostra. Buscando a viabilidade e eficiência (maior granulometria, com grande quantidade do material), foi utilizado para a esfoliação o material de granulometria passante na peneira de 1 mm e retida na peneira de 0,5 mm (-1 +0,5 mm).

4.1.4 Densidades

A Tabela 08 apresenta os valores de densidades aparente e real das amostras de VN, VE 800/10 e VE 800/15.

Tabela 08 - Densidades aparente e real de VN e VE.

Vermiculita	Densidade (g/cm ³)	
	Aparente	Real
VN	1,16	2,52
VE 800/10	0,35	2,57
VE 800/15	0,33	2,52

Fonte: Do autor (2023).

Os valores encontrados para as densidades aparentes das amostras estão em concordância com o trabalho de Curbelo et al. (2006), que ao utilizar a técnica da picnometria encontrou o valor de $0,354 \text{ g/cm}^3$ para a granulometria de 28 mesh. Os tratamentos térmicos realizados promoveram uma grande redução na densidade aparente. Esta diferença pode ser atribuída ao aumento no tamanho da partícula do material, em função da perda de água por evaporação, durante o processo de esfoliação (Rabello et al. 2019). Além disso, o tratamento térmico promove a formação de inúmeras cavidades de diversos tamanhos (poros), característica responsável pela elevação da porosidade e redução da densidade (Freitas et al. 2017).

Os valores encontrados para a densidade real dos três tratamentos foram constantes, uma vez que a densidade real não leva em consideração os poros existentes, que são todos preenchidos com gás durante a realização do ensaio. A porosidade do VE é de grande importância para aplicações na construção civil, mais precisamente na produção de blocos, tijolos, telhas, painéis, etc. uma vez que esta característica, além de tornar o material mais leve, pode deixá-lo mais resistente a propagação do calor e do som, melhorando consideravelmente o conforto térmico e acústico das instalações.

4.1.5 Área Superficial Específica (SBET)

Por meio do ensaio da área de superfície específica uma isoterma do tipo II (não apresentado), típica de sólidos mesoporosos e substratos heterogêneos, foi obtida. No entanto, durante a dessorção houve o aparecimento do fenômeno de histerese, assemelhando-se a curva do tipo H3, isso mostra a existência de poros mesoporosos em forma de fendas, cones ou pirâmides, as quais podem ser atribuídas a estruturas lamelares da Vermiculita (Thommes et al. 2015; Leofanti et al. 1998; Sing et al. 1985). Os valores encontrados para a área de superfície específica, volume e raios dos poros, são mostrados na Tabela 09.

Tabela 09 - Área superficial específica, volume e raio dos poros dos VE e VN.

Amostras	Área Superficial Específica - SBET (m^2/g)	Volume dos poros - Vp (Cc/g)	Raio dos poros - RP
VN	23,96	0,021	18,94
VE 800/10	90,40	0,036	88,23
VE 800/15	212,32	0,053	202,34

Fonte: Do autor (2023).

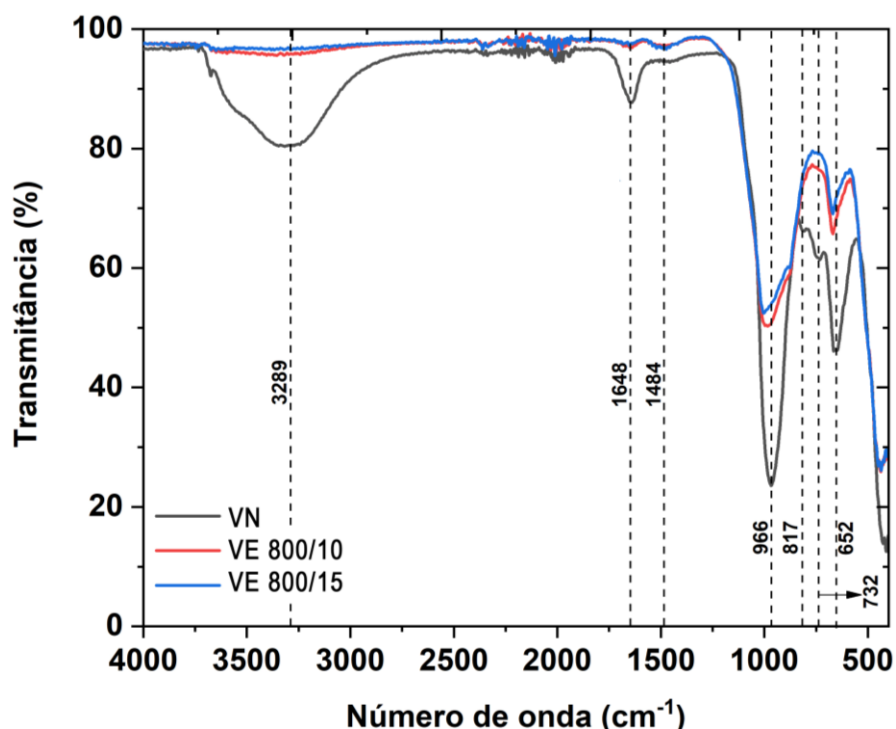
O tratamento térmico promoveu um aumento nos valores de SBET e Rp em aproximadamente 9 e 11 vezes, respectivamente, quando comparamos VE 800/15 com VN. Além disso, observa-se que estes valores mais que duplicaram com o aumento de 5 min no tratamento térmico (comparando VE 800/10 com VE 800/15). O Vp do VE 800/15 aumentou cerca de 152,38 % em comparação com VN, e, em aproximadamente 47,2 % em relação VE 800/10.

Ao contrário de alguns ensaios mais qualitativos, a exemplo da MEV e Estereomicroscopia, podemos afirmar que o efeito da temperatura e do tempo foram relevantes, não apenas no que se refere a elevação da área de superfície específica (SBET), mas também, na elevação do volume de poros (Vp) e de seus raios (Rp). Uma possível explicação para isso é que o concentrado de Vermiculita, originária da classe dos filossilicatos, apresenta moléculas de água junto as folhas de sílica do mineral. Estas moléculas, por sua vez, são expulsas, sob alta entropia, quando o mineral é exposto a temperaturas mais elevadas. Como resultado o mineral fica menos denso e se expande, com a formação de novas fendas, uma vez que as moléculas de água são substituídas por ar (Freitas et al. 2017). Isso significa que, ao contrário do que foi observado nos ensaios de análise morfológica, o tratamento térmico VE 800/15 apresentou melhor eficiência nos parâmetros almejados para pesquisa.

4.1.6 Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier (FTIR)

A Figura 22 mostra os espectros na região do infravermelho das amostras de VN, VE 800/10 e VE 800/15.

Figura 22 - FTIR dos tratamentos de concentrado de Vermiculita.



Fonte: Do autor (2023).

As atribuições da variação das bandas presentes estão descritas na Tabela 10, preenchida de acordo com Silveira et al. (2006) e Alves (2013).

Tabela 10 - Análise do FTIR dos concentrados de Vermiculita.

Número de onda			Atribuições
VN	VE 800/10	VE 800/15	
3289	–	–	Vibração de estiramento do grupo OH da H ₂ O livre
1648	1648	1648	Vibração de deformação angular do grupo OH da H ₂ O livre
1484	1484	1484	Vibração ligada ao cátion Na
966	976	990	Deformação axial de Si-O
817	–	–	Vibração de deformação Al OH
652	660	660	Deformação relativa à variação do ângulo do tetraedro Si-O

Fonte: Do autor (2023).

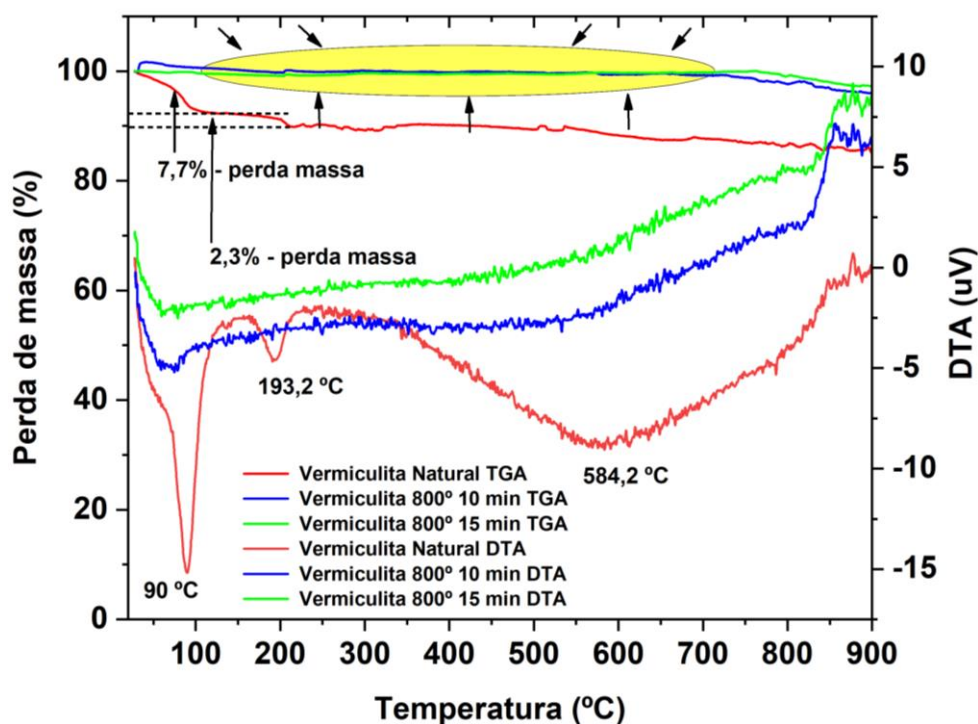
A Figura 22 exibe bandas em 3289 cm⁻¹ e em 1648 cm⁻¹, decorrentes do estiramento O-H e deformação angular, respectivamente, atribuídos a água de hidratação presente na Vermiculita. Temos ainda vibrações moleculares referentes a estiramentos assimétricos Si-O (966 cm⁻¹ e 652 cm⁻¹), além de bandas referentes a vibrações de deformação Al-OH (817 cm⁻¹) e vibrações Al-O (450 cm⁻¹). Observa-se que nos tratamentos da VE 800/10 e VE 800/15

nas regiões de vibrações moleculares em 3800 a 3000 cm^{-1} e 1648 cm^{-1} , não houve estiramentos O-H, e nem tão pouco deformação angular, podendo concluir que o tratamento térmico eliminou com eficiência as moléculas de água após esfoliação (Van der marel & Beutelspacher, 1976; Santos et al. 2002).

4.1.7 Termogravimetria (TGA)

A Figura 23 apresenta os resultados do ensaio de TGA/DTA do VN, VE 800/10 e VE 800/15.

Figura 23 - Curvas TGA e DTA dos concentrados de Vermiculita.



Fonte: Do autor (2023).

As curvas da análise termogravimétrica do VN apresentaram perdas de massa significativa nas temperaturas próximas a 90 °C (7,7 %), $193,2\text{ °C}$ (2,3 %) e $584,2\text{ °C}$ (3 %), totalizando 13 %. Observa-se que inicialmente (0 – 250 °C) o VN apresentou perdas de massa substanciais, referentes a eliminação de moléculas de água que se encontram fisicamente adsorvidas na superfície através de ligações de hidrogênio e da água de coordenação presente no espaço interlamelar. Em temperaturas mais elevadas ($250\text{ – }900\text{ °C}$), ocorreram remoções da água ligada a estrutura das amostras, seguido do processo de desidroxilação do argilomineral. Para as amostras tratadas termicamente, não se observou nenhuma perda de

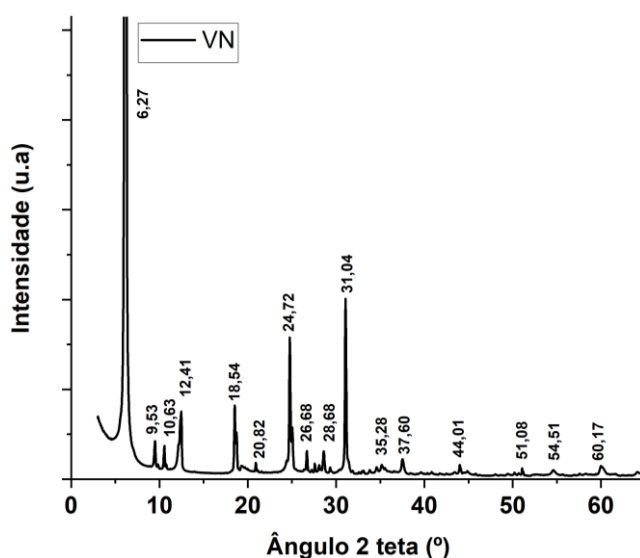
massa referentes a eliminação de moléculas de água, uma vez que estas moléculas foram removidas durante o processo de esfoliação, este comportamento pode ser observado através da demarcação de cor amarela, indicada por setas.

A curva de DTA do VN apresenta três picos endotérmicos, referentes as variações de massa observadas nas curvas de TGA. A primeira reação endotérmica ocorreu em 90 °C, característica de água de adsorção, a segunda reação endotérmica (193,2 °C) ocorreu provavelmente devido a água coordenada ligada particularmente ao magnésio e a terceira referente a desidroxilação (584,2 °C), podendo, após esta etapa, ocorrer um arranjo exotérmico devido as transições de fase ou a presença de pico duplo de caráter endo-exotérmico atribuídos a destruição do retículo cristalino e à presença de impurezas, e exemplo do quartzo alfa ou beta de mulita (Mackenzie, 1957).

4.1.8 Difração de Raios-X (DRX)

As Figura 24, 25 e 26 apresentam os Difratoogramas de Raios-X, plotados para as amostras VN, VE 800/10 e VE 800/15, respetivamente.

Figura 24 - Difração de Raios-X do VN.

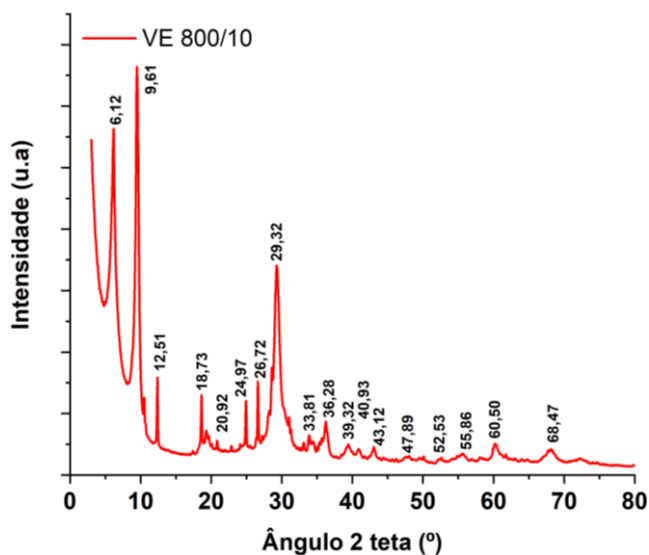


Fonte: Do autor (2023).

O Difratoograma de Raios-X do VN apresentou um pico em $2\theta = 6,27^\circ$, correspondente ao pico característico deste material argiloso magnesiano, além de picos de baixa intensidade ($12,41^\circ$; $18,54^\circ$; $24,72^\circ$; $29,18^\circ$; $29,32^\circ$, $31,04^\circ$; $37,60^\circ$ e $54,51^\circ$). Os resultados obtidos no trabalho de Ugarte et al. (2008), corroboram o observado nestes casos. Os picos em $2\theta =$

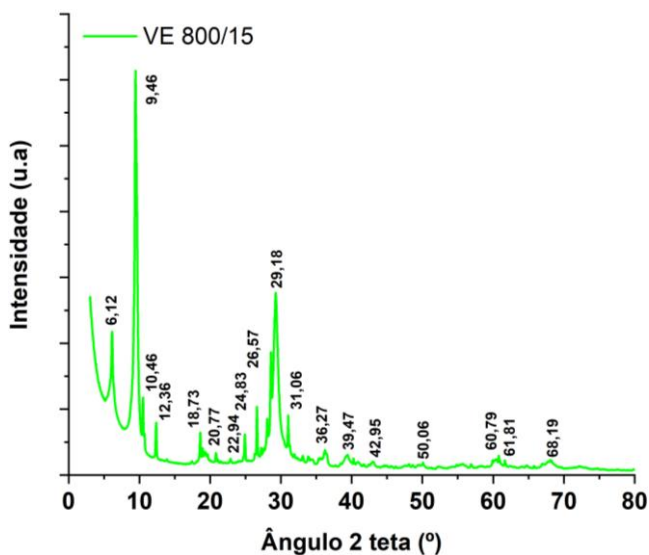
20,82°; 28,62° e 51,08°, representam algumas impurezas de magnesita, pirofilita e quartzo, nesta ordem, corroborando com os resultados técnicos apresentados pela empresa que cedeu a amostra, no que se refere ao elevado teor de concentrado de Vermiculita (83,38 %).

Figura 25 - Difração de Raios-X do VE 800/10.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 26 - Difração de Raios-X do VE 800/15.



Fonte: Do autor (2023).

Após o tratamento térmico, observou-se picos acentuados em $2\theta = 9,46^\circ$ e $9,61^\circ$, referentes aos minerais do grupo filossilicato, cuja identificação é bastante complexa devido as distorções ocasionadas pelas suas orientações preferenciais e grande variedade deste grupo de mineral, podendo ser a hidrobiotita, que é muito comum estar associado na presença da

Vermiculita (Ugarte et al. 2008). Segundo Muñoz & Catelló (2003), este resultado pode ser consequência da transformação que ocorreu com o concentrado de Vermiculita devido ao processo de expansão, que provocou desequilíbrio na sequência de empilhamento desse material, modificando sua rede cristalina. Os difratogramas das amostras tratadas termicamente (VE) também apresentaram uma redução em algumas de suas intensidades, tornando essas amostras mais amorfas em relação a amostra sem tratamento (VN). Outra característica observada após a esfoliação, está na elevação da distância interlamelar de alguns picos, que podem ser calculadas por meio da Lei de Bragg. Esta característica é outra evidência importante para se afirmar que pode ter havido mudança estrutural do mineral, após sua expansão térmica.

4.1.9 Fluorescência de Raios-X (FRX)

A Tabela 11 apresenta a composição química das amostras de concentrado de Vermiculita encontradas através do ensaio de FRX.

Tabela 11 - Composição química dos concentrados de Vermiculita.

Elementos	VN (%)	VE 800/10 (%)	VE 800/15 (%)
Si	19,63	19,89	19,29
Mg	13,17	13,41	13,33
Fe	8,84	8,90	8,92
Al	4,27	4,37	4,48
Ca	1,22	1,41	1,48
Ti	0,46	0,44	0,41
Cr	0,40	0,40	0,38
Ni	0,29	0,29	0,28
K	0,12	0,11	0,12
Mn	0,09	0,10	0,10
Sr	0,03	0,03	0,03
Cl	0,02	0,02	0,02
P	0,03	0,04	0,03
Zn	0,10	0,01	0,01
Cu	0,01	0,01	0,03
V	0,01	0,01	0,01
S	0,01	0,00	0,01
HO	0,00	0,03	0,00
Na	0,00	0,05	0,04

Fonte: Do autor (2023).

A Tabela 12 apresenta a composição química dos principais elementos das amostras de concentrado de Vermiculita após a conversão em óxidos.

Tabela 12 - Composição química dos VE e VN após conversão em óxidos.

Elementos	VN (%)	VE 800/10 (%)	VE 800/15 (%)
SiO ₂	41,99	42,55	41,27
Al ₂ O ₃	8,07	8,26	8,46
MgO	21,84	22,24	22,10
CaO	1,71	1,97	2,07
K ₂ O	0,14	0,13	0,14
Fe ₂ O ₃	12,64	12,72	12,75
TiO ₂	0,77	0,73	0,68

Fonte: Do autor (2023).

A Tabela 13 descreve a composição química da Vermiculita comercial.

Tabela 13 - Composição química da Vermiculita comercial.

Elementos	Vermiculita comercial (%)
SiO ₂	38 – 46
Al ₂ O ₃	10 – 16
MgO	16 – 35
CaO	1 – 5
K ₂ O	1 – 6
Fe ₂ O ₃	6 – 13
TiO ₂	1 – 3
H ₂ O	0,2 – 1,2

Fonte: The Vermiculite Association (2023).

Ao comparar as composições químicas das amostras de concentrado de Vermiculita analisadas com a Vermiculita comercial observa-se que os óxidos SiO₂, MgO, CaO, K₂O e Fe₂O₃ encontram-se dentro dos valores determinados pela Tabela 13, enquanto Al₂O₃ e TiO₂ estão ligeiramente abaixo dos limites determinados. De acordo com Souza et al. (2016), estas pequenas variações de quantidade dos elementos não afetam a qualidade do produto, uma vez que estão presentes em pequenas concentrações.

4.1.10 Esfoliação

Ao comparar as amostras de concentrado de Vermiculita natural e esfoliadas, observa-se que o tratamento térmico foi efetivo para os fins da pesquisa. Comparando VE 800/10 com

VE 800/15, observou-se que visualmente ambos os tratamentos expandiram, entretanto, os valores da área de superfície específica (SBET), Volume de poros (Vp) e Raios dos poros (Rp) encontrados para VE 800/15 foram superiores, indicando que a esfoliação foi mais efetiva para este tratamento. Portanto, o tratamento de 800 °C durante 15 min (VE 800/15) foi utilizado na esfoliação da Vermiculita para ser incorporado aos tijolos de solo-cimento.

4.2 Solo

4.2.1 Granulometria

A textura da primeira coleta de solo está descrita na Tabela 14.

Tabela 14 - Textura do solo.

Material	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)	Pedregulho (%)
Solo	38	12	50	0
Solo corrigido	-	-	-	-

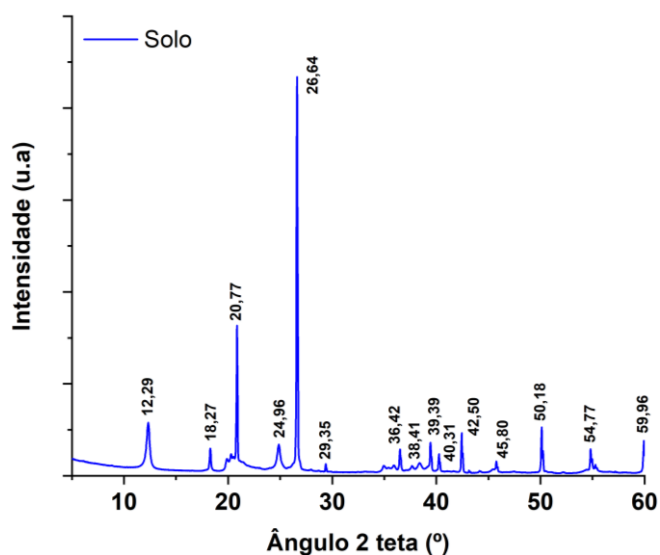
Fonte: Do autor (2023).

O solo apresentou em sua composição 38 % de argila (< 0,002 mm), 12 % de silte (0,002 – 0,06 mm) e 50 % de areia (0,06 – 2,00 mm). Os valores da granulometria atenderam as recomendações da NBR 10833 (ABNT, 2012) para a confecção de tijolos de solo-cimento, que indicam a necessidade de 100 % do material passar na peneira de abertura 4,75 mm e de 10 a 50 % passar na peneira de abertura 0,075 mm. Portanto, a correção do solo não foi necessária.

4.2.2 Difração de Raios-X (DRX)

A Figura 27 apresenta o Difratoograma da amostra de solo.

Figura 27 - Difração de Raios-X do Solo.



Fonte: Do autor (2023).

O solo desta área é constituído basicamente de Quartzo ($2\theta = 20,77$; $2\theta = 26,64$; $2\theta = 36,42$; $2\theta = 39,39$; $2\theta = 40,31$; $2\theta = 42,50$; $2\theta = 50,18$; $2\theta = 54,77$ e $2\theta = 59,96$), caulinita ($2\theta = 12,29$; $2\theta = 24,96$; $2\theta = 29,35$ e $2\theta = 45,80$), goetita ($2\theta = 24,96$) e gibsitita ($2\theta = 18,27$). Estes resultados estão de acordo com aqueles encontrados para textura das amostras de solo, onde cerca de 50 % dos constituintes é areia, conceituada como um bem mineral constituído predominantemente por quartzo de granulação fina.

4.2.3 Análise química

A Tabela 15 apresenta a composição química do solo.

Tabela 15 - Composição química do solo.

Elementos	Solo (%)
Si	8,65
Al	5,78
Fe	4,61
Ca	0,65
Ti	0,50
K	0,24
Zr	0,16
Mg	0,05
Cr	0,04
Mn	0,03
S	0,03
Zn	0,02
Sr	0,02
Ni	0,01
Ga	0,01

Fonte: Do autor (2023).

A Tabela 16 apresenta a composição química dos principais elementos do solo após a conversão em óxidos.

Tabela 16 - Composição química do solo após conversão em óxidos.

Elementos	Solo (%)
SiO ₂	18,50
Al ₂ O ₃	10,92
Fe ₂ O ₃	6,59
CaO	0,91
TiO ₂	0,83
K ₂ O	0,29
ZrO ₂	0,07
MgO	0,08

Fonte: Do autor (2023).

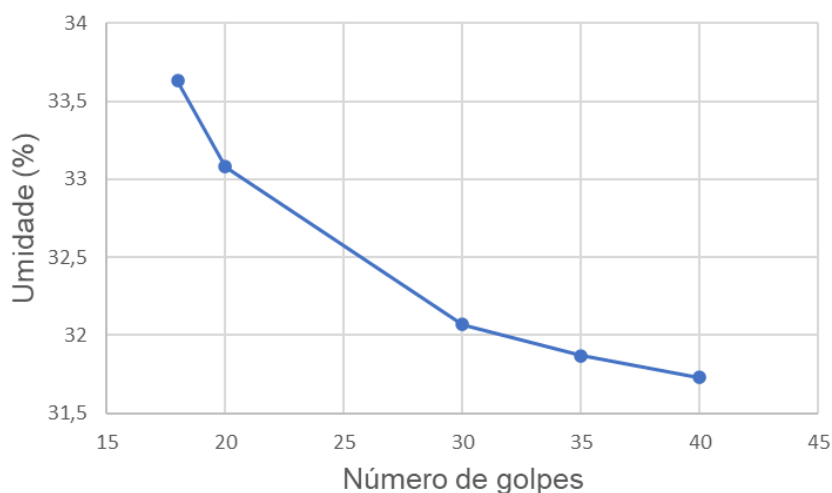
O solo apresentou pH de 6,9 (neutro), sendo ideal para a confecção dos tijolos de solo-cimento, visto que garante melhor estabilidade e durabilidade. Yang et al. (2013) aponta que

em ambientes com o pH ácido, a hidratação do cimento é prejudicada, corroborando a formação de um produto com aspecto corroído. O autor ainda infere que em ambientes com o pH alcalino, o produto pode apresentar rachaduras.

4.2.4 Limites de consistência

Através dos resultados do ensaio apresentados na Figura 28, foi possível determinar o Limite de Liquidez (LL) do solo.

Figura 28 - Limite de liquidez do solo.



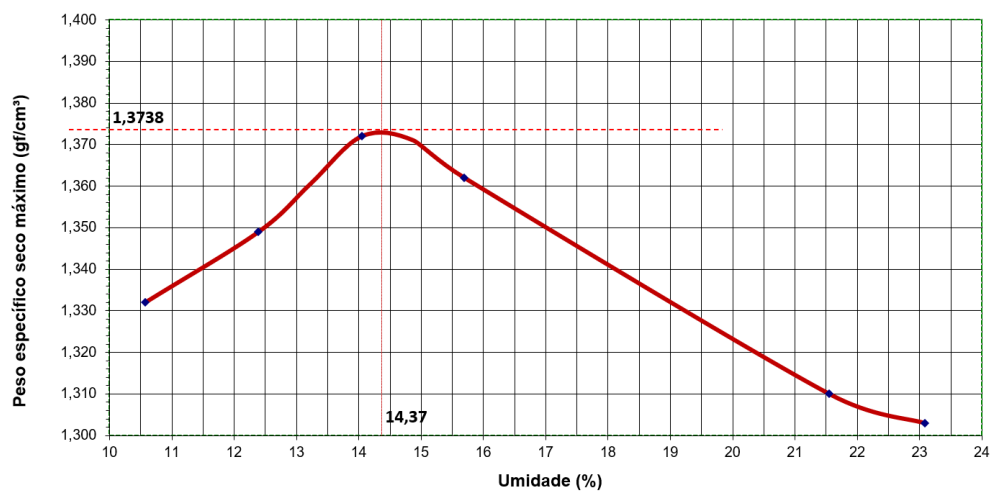
Fonte: Do autor (2023).

Os valores encontrados para os Limites de Liquidez (LL) e Plasticidade (LP) do solo, foram de 32,52 e 21,32 %, respectivamente. Já o Índice de Plasticidade (IP) foi de 11,20 %. Estes valores, estão dentro dos limites estabelecidos para a utilização do solo na fabricação de tijolos de solo-cimento, conforme a norma NBR 10833 (ABNT, 2012), que define o Limite de Liquidez e o índice de plasticidade, em valores menores ou igual a 45 e 18 %, respectivamente.

4.1.5 Ensaio de compactação

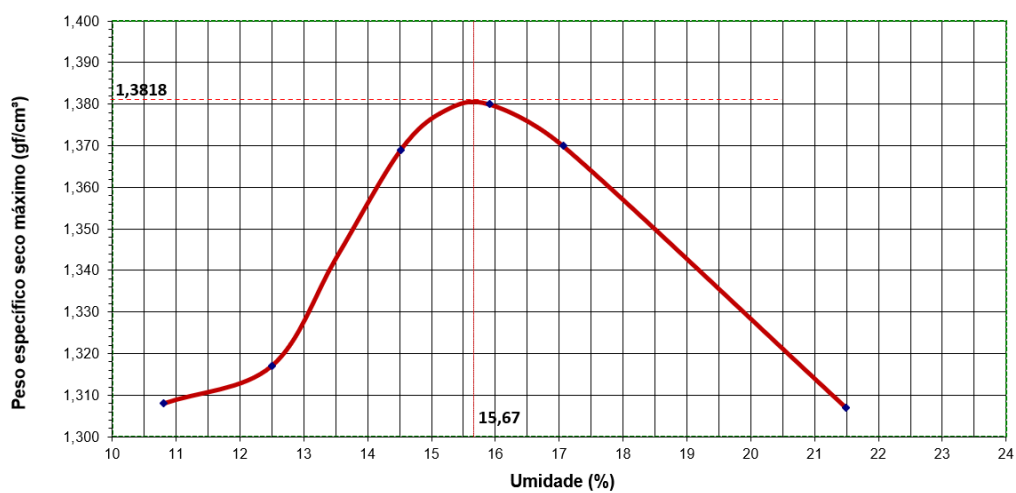
O ensaio de compactação foi realizado para os três tratamentos utilizados na confecção dos corpos de prova (0, 2,5 e 5 % de VE 800/15). As Figuras 29, 30 e 31 apresentam suas curvas de compactação, respectivamente.

Figura 29 - Curva de compactação do T1.



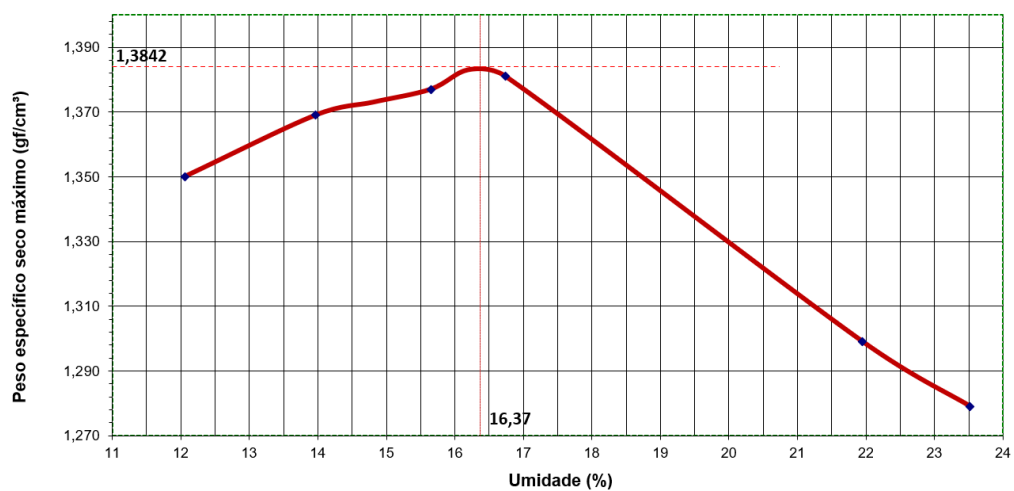
Fonte: Do autor (2023).

Figura 30 - Curva de compactação do T2.



Fonte: Do autor (2023).

Figura 31 - Curva de compactação do T3.



Fonte: Do autor (2023).

Para os tratamentos T1 (0 % de VE 800/15), T2 (2,5 % de VE 800/15) e T3 (5 % de VE 800/15), o solo apresentou valores ótimos de massa específica aparente seca de 1,374 g/cm³, 1,382 g/cm³ e 1,384 g/cm³ e 14,37, 15,67 e 16,37 % para umidade, respectivamente. Estes valores estão em concordância com o trabalho de Ribeiro (2020), que ao incorporar Vermiculita e fibra de vidro ao solo, encontrou valores médios de 1,57 g/cm³ para massa específica aparente seca e de 17,77 % para umidade.

A quantidade de água adicionada no processo de fabricação dos tijolos maciços de solo-cimento foi determinada de acordo com as umidades encontradas, neste ensaio, para os respectivos tratamentos. Portanto, as quantidades de água adicionadas foram de 14,37, 15,67 e 16,37 % para os tratamentos T1, T2 e T3, respectivamente.

4.3 Cimento

Ao comparar as características do solo com o Quadro 01, sua classificação foi determinada A6, portanto, o teor de cimento utilizado para a estabilização dos tijolos de solo-cimento foi de 12 %, como preconizado pela Tabela 01.

4.4 Tijolo maciço de solo-cimento – TMSC

4.4.1 Propriedades físicas

Os valores da densidade aparente dos tijolos maciços de solo-cimento antes do envelhecimento acelerado foram de 1,55, 1,52 e 1,49 g/cm³ e após o envelhecimento foram de 1,57, 1,56 e 1,52 g/cm³ para os tratamentos T1, T2 e T3, respectivamente. Observa-se que a densidade não apresentou variações consideráveis, entretanto a incorporação do VE sinalizou uma pequena tendência de redução em seu valor, para as amostras anteriores e posteriores ao envelhecimento, isso foi possível pois a densidade dos concentrados de Vermiculita são inferiores à do solo. Além disso, os parâmetros de variação de volume e perda de massa não resultaram em diferenças significativas, indicando tijolos com boa resistência.

Os valores encontrados para a variação de umidade dos tijolos variaram estatisticamente, sendo de 4,09, 6,28 e 10,03 % para os tratamentos T1, T2 e T3, respectivamente. Observa-se uma tendência no aumento da umidade de acordo com o acréscimo de VE, isso ocorre devido a porosidade proporcionada pelo argilomineral, que,

consequentemente, eleva a quantidade de moléculas de água que podem ser ligadas (Sabino et al. 2021).

4.4.2 Absorção de água

Os valores médios de absorção de água dos tijolos maciços de solo-cimento obtidos no ensaio, para todos os tratamentos (T1, T2 e T3), nas condições de antes e após o envelhecimento acelerado, são mostrados na Tabela 17.

Tabela 17 - Absorção de água do TMSC.

Tratamento	28 dias de cura (%)	Envelhecido (%)	Desvio padrão
T1	19,11 ± 1,33* Aa	17,59 ± 1,13* Ba	18,35 ± 1,07*
T2	19,69 ± 0,24* Aa	18,17 ± 0,16* Bb	18,93 ± 1,07*
T3	20,82 ± 0,97* Aa	19,46 ± 0,85* Ba	20,14 ± 0,96*
Desvio padrão	19,87 ± 0,87*	18,41 ± 0,96*	-

Fonte: Do autor (2023).

Nota: A, B: Letras maiúsculas diferentes nas colunas indicam diferença estatística pelo teste de média Scott-knott ($P < 0,05$); a, b: Letras minúsculas diferentes nas linhas indicam diferença estatística pelo teste de média Scott-knott ($P < 0,05$); Letras iguais não diferem entre si estatisticamente. *Desvio Padrão.

Os resultados mostraram que, não houve diferença significativa entre os tratamentos, para ambas as condições (antes e após o envelhecimento). No entanto, ao comparar os tratamentos anteriores e posteriores ao envelhecimento, observou-se uma redução significativa nos valores da absorção de água do T2, de cerca de 8 %. Provavelmente, esta redução nos valores médios de absorção de água foi acarretada pela diminuição da porosidade dos compósitos, promovidas pelo prolongamento do processo de cura. Essa ação, segundo alguns autores (Sekhar & Navak, 2018; Lang et al, 2020; Vilela et al. 2020), favorecem as reações de hidratação, ocasionando menos poros para a entrada de água.

É importante ressaltar que quanto maior o teor de VE, maior também é a absorção de água, em ambas as condições. Isso ocorre devido ao aumento da porosidade proporcionado pelo VE ao TMSC. Todos os valores médios encontrados atenderam a norma NBR 8491 (ABNT, 2012), que delimita a 20 % a absorção máxima de água em tijolos de solo-cimento.

4.4.3 Resistência à compressão

Os valores médios de resistência à compressão dos TMSC, para cada tratamento, antes e após o envelhecimento acelerado, se encontram na Tabela 18.

Tabela 18 - Resistência à compressão do TMSC.

Tratamento	28 dias de cura (MPa)	Envelhecido (MPa)	Desvio padrão
T1	0,87 ± 0,12* Aa	1,09 ± 0,19* Bb	0,98 ± 0,16*
T2	0,93 ± 0,14* Aa	1,10 ± 0,11* Bb	1,01 ± 0,12*
T3	0,96 ± 0,12* Aa	1,14 ± 0,16* Bb	1,05 ± 0,13*
Desvio padrão	0,92 ± 0,05*	1,11 ± 0,03*	-

Fonte: Do autor (2023).

Nota: A, B: Letras maiúsculas diferentes nas colunas indicam diferença estatística pelo teste de média Scott-knott ($P < 0,05$); a, b: Letras minúsculas diferentes nas linhas indicam diferença estatística pelo teste de média Scott-knott ($P < 0,05$); Letras iguais não diferem entre si estatisticamente. *Desvio Padrão.

Não houve diferenças significativas nos valores de resistência à compressão entre os tratamentos, anteriores e posteriores ao envelhecimento. Entretanto, ao comparar os tratamentos anteriores com os posteriores ao envelhecimento, observou-se diferenças estatísticas em todos os valores, destacando o T3; que aumentou sua resistência em cerca de 20 % ao envelhecer a amostra. Este resultado conflita com trabalhos encontrados na literatura, que, normalmente, apresentam reduções significativas nestes valores (Damasceno et al. 2015; Sutcu, 2015). Segundo estes autores, isso ocorre em razão do aumento da porosidade e diminuição da densidade aparente. Além disso, a redução da quantidade de cimento na mistura e a presença de vazios podem interferir negativamente no sistema solo-aglomerante (Castro, 2019). Podemos inferir então que, a boa compatibilidade química entre os componentes, bem como a efetiva ocupação de alguns espaços vazios, promovidos pela incorporação do VE, favoreceram a formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), principal componente responsável pela resistência do compósito.

Apesar do aumento da resistência à compressão ao envelhecer as amostras, nenhum dos tratamentos atendeu aos limites estabelecidos pela NBR 8491 (ABNT, 2012), que delimita o valor individual da amostra não podendo ser inferior a 1,70 MPa e o valor médio não pode ser menor do que 2,00 MPa. É importante ressaltar que a confecção dos TMSC foi executada em um mês termicamente atípico, com temperaturas máximas de até 37 °C, o que pode ter prejudicado a cura do tijolo, e conseqüentemente, ter reduzido a resistência à compressão. Além disso, não foram utilizadas lonas plásticas para cobrir as amostras no

processo de cura, que auxiliaria na redução das perdas de água para o meio, através da evaporação. Este tópico não é abordado pela NBR 10833 (ABNT, 2012), entretanto alguns trabalhos, como o de Sabino et al. (2021), utilizam deste método para obter maiores resistências. Além disso, o aumento da resistência à compressão após o envelhecimento das amostras, retifica a hipótese que o processo de cura foi prejudicado, uma vez que o ensaio de durabilidade proporcionou uma cura prolongada. Este fator, em conjunto com as elevadas temperaturas que as amostras foram submetidas, podem ter contribuído como catalizador para o tempo de cura, no caso das amostras com incorporação de VE, uma vez que a Vermiculita é um material pozolânico.

De acordo com Castro (2019), os tijolos maciços de solo-cimento produzidos poderiam ser utilizados em substituição ao adobe, por exemplo, o qual requer uma resistência à compressão menor ou igual a 0,7 MPa, de acordo com Norma Técnica Peruana de edificação NTE E.080 (Instituto de la construcción y gerencia, 2000).

4.4.4 Isolamento acústico

Os valores médios encontrados para a barreira acústica, antes e após o envelhecimento acelerado, estão descritos na Tabela 19.

Tabela 19 - Barreira acústica do TMSC.

Tratamento	28 dias de cura (dB)	Envelhecido (dB)	Desvio padrão
T1	57,00 ± 0,12* Aa	56,47 ± 0,67* Ba	56,73 ± 0,37*
T2	56,27 ± 0,61* Aa	56,60 ± 0,00*Ba	56,43 ± 0,23*
T3	48,37 ± 1,42* Ba	56,87 ± 0,12* Bb	52,62 ± 6,01*
Desvio padrão	53,88 ± 4,79*	56,65 ± 0,20*	-

Fonte: Do autor (2023).

Nota: A, B: Letras maiúsculas diferentes nas colunas indicam diferença estatística pelo teste de média Scott-knott ($P < 0,05$); a, b: Letras minúsculas diferentes nas linhas indicam diferença estatística pelo teste de média Scott-knott ($P < 0,05$); Letras iguais não diferem entre si estatisticamente. *Desvio Padrão.

Não houveram diferenças significativas nos valores de barreira acústica entre os tratamentos anteriores ao envelhecimento, com exceção do T3; que reduziu em cerca de 15 % em relação ao grupo controle. Ao comparar os tratamentos anteriores com os posteriores ao envelhecimento, verifica-se que o T3 promoveu um aumento significativo de aproximadamente 18 % na barreira acústica. É importante ressaltar que estes aumentos não

apenas na barreira acústica, mas também na resistência à compressão, encontrados para o T3 envelhecido, são incomuns. Podemos inferir que, neste caso, a cura prolongada proporcionada pelo ensaio de durabilidade, contribuiu para a formação do empacotamento por meio de reações químicas dos elementos envolvidos, possibilitando a melhora de ambos os parâmetros. No entanto, a quantidade de VE inserido ao TMSC envelhecido, parece não ter alterado sua estrutura, pois não houve diferenças estatísticas entre os resultados.

4.4.5 Isolamento térmico

A Tabela 20 apresenta os valores médios de condutividade térmica, antes e após o envelhecimento acelerado.

Tabela 20 - Condutividade térmica do TMSC.

Tratamento	28 dias de cura (W/m.K)	Envelhecido (W/m.K)	Desvio padrão
T1	3,94 ± 0,15* Aa	3,98 ± 0,04* Ba	3,96 ± 0,03*
T2	4,20 ± 0,09* Aa	3,96 ± 0,06* Bb	4,08 ± 0,17*
T3	4,05 ± 0,30* Aa	3,88 ± 0,12* Ba	3,96 ± 0,12*
Desvio padrão	4,06 ± 0,13*	3,94 ± 0,05*	-

Fonte: Do autor (2023).

Nota: A, B: Letras maiúsculas diferentes nas colunas indicam diferença estatística pelo teste de média Scott-knott ($P < 0,05$); a, b: Letras minúsculas diferentes nas linhas indicam diferença estatística pelo teste de média Scott-knott ($P < 0,05$); Letras iguais não diferem entre si estatisticamente. *Desvio Padrão.

Os resultados mostraram que houve uma melhora no isolamento térmico das amostras envelhecidas com incorporação de VE; reduzindo os valores de condutividade térmica em cerca de 6 e 4 % para os tratamentos T2 e T3, respectivamente. Entretanto, não houveram variações estatísticas entre os tratamentos, exceto para T2, quando comparado os valores anteriores com os posteriores ao envelhecimento. De acordo com Doubi et al. (2017) a condutividade térmica está diretamente relacionada com o processo de formação de poros. Neste sentido, o tratamento térmico de esfoliação realizado no concentrado de Vermiculita pode ter alterado a formação dos poros em seu interior, proporcionando melhor eficiência; destacando o T3 envelhecido, com menor valor de condutividade térmica. Além disso, o VE é um material isolante natural, o que corrobora com a redução na condutividade de calor. Resultados semelhantes foram encontrados por Sangrutsamee et al. (2012) e Oti et al. (2010).

5. CONCLUSÃO

Os tratamentos térmicos realizados nos concentrados de Vermiculita foram efetivos e visivelmente observáveis (MEV e Estereomicroscopia). Os concentrados apresentaram teor de 83,38 %, ausência de contaminantes e classificação granulométrica superfino. A esfoliação resultou na redução de aproximadamente 70 % da densidade dos VE em relação ao VN. Além disso, as áreas superficiais específicas (SBET), volume dos poros (Vp) e raio dos poros (Rp) aumentaram expressivamente, para ambos os tratamentos esfoliados, no qual o VE 800/15 se destacou com aumentos de aproximadamente 9, 1,5 e 11 vezes, respectivamente, em relação ao grupo controle. Os ensaios de FTIR e TGA confirmaram que o tratamento térmico eliminou, com eficiência, as moléculas de água, após a expansão do material.

O tratamento térmico do concentrado de Vermiculita mais compatível com os objetivos da pesquisa foi a esfoliação a 800 °C durante 15 minutos (VE 800/15). Este tratamento se destacou nos ensaios de área superficial específica (SBET), volume dos poros (Vp) e raios dos poros (Rp), que aumentaram em cerca de 9, 1,5 e 11 vezes, respectivamente, em relação ao grupo controle. Além disso, apresentou resultados favoráveis nos outros ensaios quando comparado ao VN, mas não se diferenciava expressivamente do VE 800/100. Portanto, o VE 800/15 foi utilizado na confecção dos corpos de prova, em conjunto com o solo e o cimento.

A composição do solo utilizado foi de 38 % de argila, 12 % de silte e 50 % de areia, atendendo a todas as recomendações da NBR 10833 (ABNT, 2012), não necessitando de correções. Este é constituído de basicamente Quartzo, caulinita, geotita e gibsita e apresentou pH de 6,9 (neutro). Os limites de consistência encontrados foram de 32,52, 21,32 e 11,20 % para o Limite de liquidez (LL), Limite de plasticidade (LP) e Índice de plasticidade (IP), respectivamente. Os tratamentos utilizados na confecção dos TMSC apresentaram valores ótimos de massa específica aparente seca de 1,374 g/cm³, 1,382 g/cm³ e 1,384 g/cm³ e 14,37, 15,67 e 16,37 % para umidade, para o T1, T2 e T3, respectivamente. O teor de 12 % de cimento utilizado na estabilização dos tijolos maciços de solo-cimento foi definido de acordo com a classificação do solo (A6).

Após a confecção dos corpos de prova dos tijolos maciços de solo-cimento e realização dos ensaios observou-se que a densidade não apresentou variações consideráveis, entretanto a incorporação do VE sinalizou uma pequena tendência de redução em seu valor. Além disso, os valores encontrados para a variação de umidade dos tijolos variaram estatisticamente, com o aumento da umidade de acordo com o acréscimo de VE. Isso se

justifica devido à baixa densidade do argilomineral e sua porosidade, que eleva a quantidade de moléculas de água que podem ser ligadas. A absorção de água também manteve a tendência de aumento de acordo com a quantidade incorporada de VE 800/15, antes e após o envelhecimento, entretanto seus valores não variaram estatisticamente, exceto T2; que quando envelhecido seu valor reduziu em aproximadamente 8 %. Todos os valores médios encontrados de absorção de água atenderam a norma NBR 8491 (ABNT, 2012).

Os resultados encontrados para a resistência à compressão dos TMSC não atenderam aos limites mínimos estabelecidos pela NBR 8491 (ABNT, 2012), no entanto seus valores aumentaram de forma significativa para todos os tratamentos, após o envelhecimento, destacando T3; que aumentou em aproximadamente 20 % sua resistência. Além disso, observou-se uma tendência do aumento das resistências de acordo com a quantidade de incorporação de VE 800/15. A baixa resistência encontrada foi consequência do processo de cura ter sido prejudicado pelas altas temperaturas e não utilização de lonas plásticas para cobrir as amostras, com função de reter a água no sistema, que seria evaporada. O aumento de resistência após o envelhecimento das amostras se justifica pelo prolongamento da cura, promovido pelo ensaio de durabilidade.

Com relação ao isolamento acústico do TMSC, os valores encontrados para a barreira acústica não variaram estatisticamente, exceto para T3; que antes do envelhecimento, obteve resultados inferiores aos outros tratamentos e após o envelhecimento, o tratamento obteve um aumento significativo da barreira acústica, de aproximadamente 18 %.

Os resultados encontrados para o isolamento térmico do TMSC apresentaram melhoras para as amostras envelhecidas. Nenhum tratamento variou estatisticamente, exceto T2; que reduziu a condutividade térmica em aproximadamente 6 %.

O tratamento de tijolo maciço de solo-cimento produzido que possuiu as propriedades mais adequadas para os objetivos da pesquisa foi o T3, entretanto, este não atendeu aos limites mínimos de resistência à compressão, estabelecidos pela NBR 8491 (ABNT, 2012), portanto, não pode ser utilizado como TMSC. Uma aplicação para estes tijolos seria em substituição ao adobe, por exemplo, o qual requer uma resistência à compressão menor ou igual a 0,7 MPa.

6. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

Para futuros trabalhos, sugere-se a utilização de lonas de plástico para cobrir os tijolos em seu processo de cura, evitando a perda de água para o meio através da evaporação. Outro importante ponto é a realização da pesquisa na região de extração da Vermiculita (com a utilização de todas as matérias primas locais), melhorando a logística e reduzindo gastos. Além disso, é necessário estudar novas formas de potencializar ainda mais as propriedades do compósito, com aditivos e metodologias próprias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMARI, S.; ZHANG, L. Durability and leaching behavior of mine tailings-based geopolymer bricks. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 44, p. 743-750, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.075>
- AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS – AASHTO. 2017. Disponível em: http://www.cct.udesc.br/arquivos/id_submenu/1470/classificacao_rodoviaria_hrb.pdf Acesso em março/2023.
- ANDREOLA, F.; BARBIERI, L.; LANCELLOTTI, I.; LEONELLI, C.; MANFREDINI, T. Recycling of industrial wastes in ceramic manufacturing: state of art and glass case studies. **Ceramics International**, [S.L.], v. 42, n. 12, p. 13333-13338, set. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.05.205>
- ALVES, A. P. M.; FOSECA, M. G.; WANDERLEY, A. F. Inorganic-organic hybrids originating from organosilane anchored onto leached vermiculite. **Materials Research** (São Carlos. Impresso), v. 16, p. 891-897, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000076>
- ARSENOVIĆ, M.; RADOJEVIĆ, Z.; JAKLIĆ, Ž.; PEZO, L. Mathematical approach to application of industrial wastes in clay brick production—Part II: optimization. **Ceramics International**, [S.L.], v. 41, n. 3, p. 4899-4905, abr. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.12.050>
- ARSENOVIĆ, M.; STANKOVIĆ, S.; RADOJEVIĆ, Z.; PEZO, L. Prediction and fuzzy synthetic optimization of process parameters in heavy clay brick production. **Ceramics International**, [S.L.], v. 39, n. 2, p. 2013-2022, mar. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.08.053>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. Dosagem das misturas de solo-cimento – normas de dosagem. São Paulo: ABCP, **Estudo Técnico ET – 35**, 1986. 51p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**: Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**: Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8491**: Tijolo de solo-cimento - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8492**: Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10833**: Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12023**: Solo-cimento – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13554**: Solo-cimento – Ensaio de durabilidade por molhagem e secagem – Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Ministério do Trabalho e Emprego. NR-10 – Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2004. Acesso em: 10 março. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Ministério do Trabalho e Emprego. NR-12 – Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos. Brasília: Ministério do Trabalho e Emprego, 2019. Acesso em: 10 março. 2023.

BARABASZOVÁ, K. Č.; VALÁLKOVÁ, M. Characterization of vermiculite particles after different milling techniques. **Powder Technology**, [S.L.], v. 239, p. 277-283, maio 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2013.01.053>

BASSET, W. A., 1963. The geology of vermiculite occurrences. *Clays and Clay Minerals* 10, 61–96.

BRASIL. Ministério da Agricultura e do abastecimento – MAPA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro, CNPS/EMBRAPA, 1997, 212p.

BRASIL MINÉRIOS. **Relatório fornecido pela empresa Brasil Minérios**. 2023. Site da empresa: <https://brasilminerios.com.br>. Acesso em: Março/2023.

CASTRO, E. D.; VILLELLA, L. S.; MENDES, L. M.; MENDES, R. F.; RIBEIRO, A. G. C.; GUIMARÃES JÚNIOR, J. B.; RABELO, G. F. ANALYSIS OF THE COFFEE PEEL APPLICATION OVER THE SOIL-CEMENT BRICKS PROPERTIES. **Coffee Science**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 12, 28 mar. 2019. Coffee Science. <http://dx.doi.org/10.25186/cs.v14i1.1503>

CURBELO, F. D. S.; Garnica, A. I. C.; Oliveira, E. L.; BARROS NETO, E. L. OIL REMOVAL IN PRODUCED WATER USING EXPANDED AND HYDROPHOBIZED VERMICULITE AS ADSORBENT. **Afinidad** (Barcelona), Barcelona, v. 63, n.521, p. 35-39, 2006.

DAMASCENO, F. A.; MACEDO, O. A. P.; OLIVEIRA, J. L.; OLIVEIRA, C. E. A.; BRANDÃO, L. F. Propriedades Físicas, Mecânicas e Térmicas de Telhas de Concreto Fabricadas com Adição de Diferentes Materiais Isolantes. **Revista Engenharia na Agricultura - Reveng**, [S.L.], v. 23, n. 5, p. 406-417, 30 out. 2015. Revista Engenharia na Agricultura. <http://dx.doi.org/10.13083/1414-3984/reveng.v23n5p406-417>

DHANDHUKIA, P.; GOSWAMI, D.; THAKOR, P.; THAKKER, J. N. Soil property apotheosis to corral the finest compressive strength of unbaked adobe bricks. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 48, p. 948-953, nov. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.07.043>

DISSANAYAKE, P. D.; CHOI, S. W.; IGALAVITHANA, A. D.; YANG, X.; TSANG, D. C.W.; WANG, C.; KUA, H. W.; LEE, K. B.; OK, Y. S. Sustainable gasification biochar as a high efficiency adsorbent for CO2 capture: a facile method to designer biochar fabrication. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, [S.L.], v. 124, p. 109785, 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2020.109785>

DOUBI, H. G.; KOUAMÉ, A. N.; KONAN, L. K.; TOGNONVI, M.; OYETOLA, S. Thermal Conductivity of Compressed Earth Bricks Strengthening by Shea Butter Wastes with Cement. **Materials Sciences And Applications**, [S.L.], v. 08, n. 12, p. 848-858, 2017. Scientific Research Publishing, Inc. <http://dx.doi.org/10.4236/msa.2017.812062>

FERREIRA, R. C.; GOBO, J. C. C.; CUNHA, A. H. N. Incorporação de casca de arroz e de braquiária e seus efeitos nas propriedades físicas e mecânicas de tijolos de solo-cimento. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 28, n. 1, p. 1-11, mar. 2008. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-69162008000100001>

FREITAS, E. D.; ALMEIDA, H. J.; VIEIRA, M. G. A. Binary adsorption of zinc and copper on expanded vermiculite using a fixed bed column. **Applied Clay Science**, [S.L.], v. 146, p. 503-509, set. 2017. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2017.07.004>

HILLIER, S.; MARWA, E. M. M.; RICE, C. M. On the mechanism of exfoliation of ‘Vermiculite’. **Clay Minerals**, [S.L.], v. 48, n. 4, p. 563-582, set. 2013. Mineralogical Society. <http://dx.doi.org/10.1180/claymin.2013.048.4.01>

INSTITUTO DE LA CONSTRUCCIÓN Y GERENCIA. **NTE E.080**: regulamento. Lima: Nacional Construcciones, 2000. 17 p.

JORDAN, R. A.; COSTA, M. V.; MARTINS, E. A. S.; ROSA, M. A.; PETRAUSKI, A. Manufacture of soil-cement bricks with the addition of sugarcane bagasse ash. **Engenharia Agrícola**, [S.L.], v. 39, n. 1, p. 26-31, fev. 2019. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-eng.agric.v39n1p26-31/2019>

KAYA, F. Damage assessment of oxide fibre reinforced oxide ceramic matrix composites using acoustic emission. **Ceramics International**, [S.L.], v. 33, n. 2, p. 279-284, mar. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2005.11.016>

KONGKAJUN, N.; LAITILA, E. A.; INEURE, P.; PRAKAYPAN, W.; CHERDHIRUNKORN, B.; CHAKARTNARODOM, P. Soil-cement bricks produced from local clay brick waste and soft sludge from fiber cement production. **Case Studies In Construction Materials**, [S.L.], v. 13, p. 2214-5095, dez. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cscm.2020.e00448>

KOÇYIĞIT, F.; ÇAY, V. V. The Effect of Natural Resin on Thermo-physical Properties of Expanded Vermiculite–Cement Composites. **International Journal Of Thermophysics**, Diyarbakır, v. 41, n. 10, p. 1-24, 26 jul. 2020. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s10765-020-02719-3>

LANG, L.; CHEN, B.; PAN, Y. Engineering properties evaluation of unfired sludge bricks solidified by cement-fly ash-lime admixed nano-SiO₂ under compaction forming technology. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 259, p. 119879, out. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119879>

Leofanti G., Padovan M., Tozzola G. 1998 Surface area and pore texture of catalysts. **Catalysis Today**, Milano, 41: 207-219

MARCHIORI, J. C. Análise das propriedades físicas e mecânicas de tijolos solo-cimento prensados com a incorporação de materiais alternativos. 2020. 122 f. Monografia (Bacharel) - Curso de Engenharia Mecânica, Instituto Federal do Espírito Santo, São Mateus, 2020.

MACKENZIE, R. S. The Differential Thermal Investigation of Clays, Mineralogical Society, London, 1957.

MARCOS, C., ARGÜELLES, A., RUÍZ-CONDE, A., SÁNCHEZ-SOTO, P. J., BLANCO, J. A., 2003. Study of the dehydration process of vermiculites by applying a vacuum pressure: formation of interstratified phases. *Mineralogical Magazine* 67 (6), 1253–1268. <https://doi.org.ez26.periodicos.capes.gov.br/10.1180/0026461036760163>

MARCOS, C.; ARANGO, Y.; RODRIGUEZ, I. X-ray diffraction studies of the thermal behaviour of commercial vermiculites. **Applied Clay Science**, [S.L.], v. 42, n. 3-4, p. 368-378, jan. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2008.03.004>

MARCOS, C.; RODRÍGUEZ, I. Exfoliation of vermiculites with chemical treatment using hydrogen peroxide and thermal treatment using microwaves. **Applied Clay Science**, [S.L.], v. 87, p. 219-227, jan. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2013.11.008>

MEDEIROS, M. A.; SANSIVIERO, M. T. C.; ARAÚJO, M. H.; LAGO, R. M. Modification of vermiculite by polymerization and carbonization of glycerol to produce highly efficient materials for oil removal. **Applied Clay Science**, [S.L.], v. 45, n. 4, p. 213-219, ago. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2009.06.008>

MESQUITA, J. P.; REIS, L. S.; PURCENO, A. D.; DONNICI, C. L.; LAGO, R. M.; PEREIRA, F. V. Carbon-clay composite obtained from the decomposition of cellulose nanocrystals on the surface of expanded vermiculite. **Journal Of Chemical Technology & Biotechnology**, [S.L.], v. 88, n. 6, p. 1130-1135, 24 out. 2012. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/jctb.3952>

METZKER, S. L. O.; SABINO, T. P. F.; MENDES, J. F.; RIBEIRO, A. G. C.; MENDES, R. F. Soil-cement bricks development using polymeric waste. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 1, p. 1-15, 2021. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-16769-z>

MORAES, D. S.; RODRIGUES, E. M. S.; LAMARÃO, C. N.; MARQUES, G. T.; RENTE, A. F. S. New sodium activated vermiculite process. Testing on Cu²⁺ removal from tailing dam waters. **Journal Of Hazardous Materials**, [S.L.], v. 366, p. 34-38, mar. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2018.11.086>

MORAES, E. G.; SANGIACOMO, L.; STOCHERO, N. P.; ARCARO, S.; BARBOSA, L. R.; LENZI, A.; SILIGARDI, C.; OLIVEIRA, A. P. Novaes de. Innovative thermal and acoustic insulation foam by using recycled ceramic shell and expandable styrofoam (EPS) wastes. **Waste Management**, [S.L.], v. 89, p. 336-344, abr. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2019.04.019>

Muñoz, L.S.; Castelló, J.B.C. *Materias Primas y Aditivos Cerâmicos*, 1a Ed. Editora Faenza Iberica S.I., 2003.

NASCIMENTO, E. S. S.; SOUZA, P. C.; OLIVEIRA, H. A.; JÚNIOR, C. M. M.; ALMEIDA, V. G. O.; MELO, F. M. C. Soil-cement brick with granite cutting residue reuse. **Journal Of Cleaner Production**, [S.L.], v. 321, p. 129002, out. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129002>

NATH, A. J.; LAL, R.; DAS, A. K. Fired Bricks: co2 emission and food insecurity. **Global Challenges**, [S.L.], v. 2, n. 4, p. 1700115, abr. 2018. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/gch2.201700115>

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU. **17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 2030**.

Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 11 dez. 2023.

OTI, J. E.; KINUTHIA, J. M.; BAI, J. Design thermal values for unfired clay bricks. **Materials & Design**, [S.L.], v. 31, n. 1, p. 104-112, jan. 2010. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matdes.2009.07.011>

PACHECO-TORGAL, F.; ABDOLLAHNEJAD, Z.; CAMÕES, A.F.; JAMSHIDI, M.; DING, Y. Durability of alkali-activated binders: a clear advantage over portland cement or an unproven issue?. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 30, p. 400-405, maio 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.017>

PEREIRA, B. R. F. *Materiais alternativos para divisões internas em construções*. 2020. 77 f. Tese (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação de Biomateriais, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2020.

PRASERTSAN, S.; THEPPAYA, G.; KIRIRAT, P. P. Development of an energy-efficient brick kiln. **International Journal Of Energy Research**. Hat Yai, p. 1363-1383. jan. 1997. [https://doi-org.ez26.periodicos.capes.gov.br/10.1002/\(SICI\)1099-114X\(199712\)21:15<1363::AID-ER336>3.0.CO;2-9](https://doi.org.ez26.periodicos.capes.gov.br/10.1002/(SICI)1099-114X(199712)21:15<1363::AID-ER336>3.0.CO;2-9)

PURCENO, A. D.; BARRIONI, B. R.; DIAS, A.; COSTA, G. M.; LAGO, R. M.; MOURA, F. C.C. Carbon nanostructures-modified expanded vermiculites produced by chemical vapor deposition from ethanol. **Applied Clay Science**, [S.L.], v. 54, n. 1, p. 15-19, nov. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2011.06.012>

RABELLO, L. G.; RIBEIRO, R. C. da C. A novel vermiculite/ vegetable polyurethane resin-composite for thermal insulation eco-brick production. **Composites Part B: Engineering**, [S.L.], v. 221, p. 109035, set. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2021.109035>

RABELLO, L. G.; RIBEIRO, R. C. C.; BARRO, M. M.; OLIVEIRA, G. M. Produção de tijolos ecológicos de vermiculita e poliuretano. In: Congresso brasileiro de polímeros (15 CBPOL), 15., 2019, Bento Gonçalves. Anais do 15 Congresso Brasileiro de Polímeros (15 CBPOL). Bento Gonçalves: 2019.

RABELLO, L. G.; RIBEIRO, R. C. C.; BARRO, M. M.; OLIVEIRA, G. M. Produção de tijolos ecológicos de vermiculita natural ou expandida contendo resina poliuretana vegetal. In: Congresso brasileiro de polímeros (15 CBPOL), 15., 2019, Bento Gonçalves. Anais do 15o Congresso Brasileiro de Polímeros (15 CBPOL). Bento Gonçalves: 2019.

RAMALHO, F. M. G.; CARVALHO, G. S.; HEIN, P. R. G.; NAPOLI, A.; WOJCIESZAK, R.; GUILHERME, L. R. G. Artificial Neural Networks To Distinguish Charcoal from Eucalyptus and Native Forests Based on Their Mineral Components. **Energy & Fuels**, [S.L.], v. 34, n. 8, p. 9599-9608, 21 jul. 2020. American Chemical Society (ACS). <http://dx.doi.org/10.1021/acs.energyfuels.0c01034>

- RASHAD, A. M. Vermiculite as a construction material – A short guide for Civil Engineer. **Construction And Building Materials**, v. 125, p. 53-62, out. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.019>
- RIBEIRO, V. S. **Desempenho de tijolos solo cimento produzidos com fibra de vidro e vermiculita**. 2020. 45 f. Monografia (Bacharel) - Curso de Engenharia de Materiais, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2020.
- SABINO, T. P. F.; COELHO, N. P. F.; ANDRADE, N. C.; METZKER, S. L. O.; VIANA, Q. S.; MENDES, J. F.; MENDES, R. F. Lignocellulosic materials as soil–cement brick reinforcement. **Environmental Science And Pollution Research**, Lavras, v. 29, n. 15, p. 21769-21788, 12 nov. 2021. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-021-17351-3>
- SAILESH, R.; YUVARAJ, L.; DODDAMANI, M.; CHINNAPANDI, L. B. M.; PITCHAIMANI, J. Sound absorption and transmission loss characteristics of 3D printed bio-degradable material with graded spherical perforations. **Applied Acoustics**, [S.L.], v. 186, p. 108457, jan. 2022. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108457>
- SANGRUTSAMEE, V.; SRICHANDR, P.; POOLTHONG, N. Re-Pulped Waste Paper-Based Composite Building Materials with Low Thermal Conductivity. **Journal Of Asian Architecture And Building Engineering**, [S.L.], v. 11, n. 1, p. 147-151, maio 2012. Informa UK Limited. <http://dx.doi.org/10.3130/jaabe.11.147>
- SANTILLI, C. V., PULCINELLI, S. H. Análise da Textura de Materiais Cerâmicos a partir de Isotermas de Adsorção de Gases. **Cerâmica**, 39 (259), 1993, p 11-16.
- SANTOS, C.P.F.; MELO, D.M.A.; MELO, M.A.F.; SOBRINHO, E.V. Caracterização e Usos de Argilas Bentonitas e Vermiculitas para Adsorção de Cobre (II) em Solução, *Cerâmica*, Vol. 48, No. 308, pp. 178-182, 2002.
- SANTOS, S. S. G.; SILVA, H. R. M.; SOUZA, A. G.; ALVES, A. P. M.; SILVA FILHO, E. C.; FONSECA, M. G. Acid-leached mixed vermiculites obtained by treatment with nitric acid. **Applied Clay Science**, [S.L.], v. 104, p. 286-294, fev. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2014.12.008>
- SEKHAR, D. C.; NAYAK, S. Utilization of granulated blast furnace slag and cement in the manufacture of compressed stabilized earth blocks. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 166, p. 531-536, mar. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.125>
- SILVEIRA, D. M.; MARTINS, J.; MELO, T. M. S.; GIL, L. F.; Souza, L. A. Avaliação da Capacidade de Adsorção de Vermiculita Hidrofóbica em Contato Direto com Óleo. **Revista da Escola de Minas (Impresso)**, v. 59, p. 329-333, 2006. <https://doi.org/10.1590/S0370-44672006000300013>
- SING K. S. W., Everett D. H., HAUL R. A. 1985. W. Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. **Pure & App. Chem**, Brunel. 57 (4): 603-619
- SIQUEIRA, F. B.; HOLANDA, J.N.F. Reuse of grits waste for the production of soil–cement bricks. **Journal Of Environmental Management**, [S.L.], v. 131, p. 1-6, dez. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.09.040>
- SISVAR. **Sistema de Análise de Variância**. Versão 5.6. Lavras: UFLA/DEX, 2021. Disponível em: <http://www.dex.ufla.br/dpp/site/sisvar>. Acesso em: Dezembro/2023.
- SKINDER, B. M.; SHEIKH, A. Q.; PANDIT, A. K.; GANAI, B. A.; KUCHY, A. H. Effect of brick kiln emissions on commonly used vegetables of Kashmir Valley. **Food Science & Nutrition**, [S.L.], v. 3, n. 6, p. 604-611, 25 jun. 2015. Wiley. <http://dx.doi.org/10.1002/fsn3.252>
- SOUZA, M. M.; MENDES, L. J. D. B.; NÓBREGA, L. F. P. de M. Ensaio da esfoliação térmica de vermiculita da Paraíba. In: **CONGRESSO TÉCNICO CIENTÍFICO DE ENGENHARIA E DA AGRONOMIA**, Foz do Iguaçu. Apresentação. Foz do Iguaçu: Soea, 2016. p. 1-5.

SUN, J. X.; LIU, P. S. Optimization of structural parameters for the sound absorption performance of a cellular ceramic foam. **Multidiscipline Modeling In Materials And Structures**, [S.L.], v. 17, n. 6, p. 1108-1118, 1 out. 2021. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/mmms-05-2021-0082>

SUN, J.; ZHANG, H.; WU, G.; LIU, Z.; FENG, Y.; JIA, M. Micro-structural analysis of noise reduction mechanism of porous asphalt mixture based on FEM. **Multidiscipline Modeling In Materials And Structures**, [S.L.], v. 17, n. 6, p. 1154-1167, 10 set. 2021. Emerald. <http://dx.doi.org/10.1108/mmms-05-2021-0085>

SUTCU, M. Influence of expanded vermiculite on physical properties and thermal conductivity of clay bricks. **Ceramics International**, [S.L.], v. 41, n. 2, p. 2819-2827, mar. 2015. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2014.10.102>

THOMMES, M.; KANEKO K.; NEIMARK A. V.; OLIVER, J. P.; RODRIGUES-REINOSO, F.; ROUQUEROL, J.; SING, K. S. W. Physisorption of gases, with special reference to the evaluation of surface área and pore size distribution (IUPAC Technical Report). **Pure Appl. Chem.** 87: 1052-1069, 2015.

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

VALÁLKOVÁ, M.; HUNDÁKOVÁ, M.; SMETANA, B.; DROZDOVÁ, L.; KLEMM, V.; RAFAJA, D. Cordierite/CeO₂ ceramic nanocomposites from vermiculite with fixed CeO₂ nanoparticles, talc and kaolin. **Applied Clay Science**, [S.L.], v. 179, p. 105150, out. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2019.105150>

VALÁLKOVÁ, M.; TOKARSKÝ, J.; HUNDÁKOVÁ, M.; ZDRÁLKOVÁ, J.; SMETANA, B. Role of vermiculite and zirconium–vermiculite on the formation of zircon–cordierite nanocomposites. **Applied Clay Science**, [S.L.], v. 75-76, p. 100-108, maio 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2013.02.015>

VALDIVIEZO, E. V.; Souza, M.M. Estudo Mineralógico e Propriedades de Esfoliação Térmica da Vermiculita de Santa Luzia - PB. Ambiente Mineral - **Revista Brasileira de Mineração e Meio Ambiente**, v. 01, p. 62-68, 2010.

VAN DER MAREL, H.W.; BEUTELSPACHER, H. – Atlas of Infrared Spectroscopy of Clay Minerals and their Admixtures, Elsevier Scientific Publishing Company, 1976.

VELASCO, P. M.; ORTÍZ, M. P. M.; GIRÓ, M. A. M.; VELASCO, L. M. Fired clay bricks manufactured by adding wastes as sustainable construction material – A review. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 63, p. 97-107, jul. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.045>

VILELA, A. P.; EUGÊNIO, T. M. C.; OLIVEIRA, F. F.; MENDES, J. F.; RIBEIRO, A. G. C.; VAZ, L. E. V. S. B.; MENDES, R. F. Technological properties of soil-cement bricks produced with iron ore mining waste. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 262, p. 120883, nov. 2020. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.120883>

THE VERMICULITE ASSOCIATION. **Vermiculite Data**. Disponível em: <https://www.vermiculite.org>. Acesso em: 21 jul. 2023.

VIANA, Q. S.; E.; Tony, M. C.; SABINO, T. P. F.; SCOLFORO, J. R. S.; MENDES, R. F. Physical, mechanical, and thermal properties of concrete roof tiles produced with vermiculite. **Environmental Science And Pollution Research**, [S.L.], v. 29, n. 32, p. 48964-48974, 24 fev. 2022. Springer Science and Business Media LLC. <http://dx.doi.org/10.1007/s11356-022-19337-1>

WANG, Y.; WANG, Y.; XU, J.; YU, H.; ZHANG, C.; REN, L. Broadband low-frequency sound absorption by coiled-up space embedded in a porous layer. **Applied Acoustics**, [S.L.], v. 182, p. 108226, nov. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2021.108226>

YANG, Y.; WANG, G.; XIE, S.; TU, X.; HUANG, X. Effect of mechanical property of cemented soil under the different pH value. **Applied Clay Science**, [S.L.], v. 79, p. 19-24, jul. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2013.02.014>

ZHANG, L. Production of bricks from waste materials – A review. **Construction And Building Materials**, [S.L.], v. 47, p. 643-655, out. 2013. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.05.043>

ANEXOS

Quadro 03 - Absorção de água - Valores individuais.

Tratamento	Corpo de prova	28 dias de cura (%)	Envelhecido (%)
T1	1	19,96	18,30
	2	19,79	18,18
	3	17,58	16,28
T2	1	19,96	18,34
	2	19,49	18,01
	3	19,61	18,16
T3	1	20,18	18,91
	2	20,35	19,04
	3	21,93	20,43

Fonte: Do autor (2024).

Quadro 04 - Resistência à compressão - Valores individuais.

Tratamento	Corpo de prova	28 dias de cura (MPa)	Envelhecido (MPa)
T1	1	0,87	1,42
	2	0,84	1,18
	3	0,97	1,18
	4	0,94	0,84
	5	1,02	0,93
	6	0,79	1,03
	7	0,67	1,07
T2	1	1,03	0,99
	2	0,74	1,20
	3	0,77	1,22
	4	0,99	1,03
	5	1,11	1,25
	6	1,03	1,06
	7	0,87	1,03
T3	1	0,80	1,00
	2	0,85	1,06
	3	0,87	1,08
	4	1,04	1,19
	5	1,01	1,00
	6	1,11	1,45
	7	1,01	1,19

Fonte: Do autor (2024).

Quadro 05 - Barreira acústica - Valores individuais.

Tratamento	Corpo de prova	28 dias de cura (dB)	Envelhecido (dB)
T1	1	57,00	56,80
	2	57,20	56,90
	3	56,80	55,70
T2	1	56,80	56,60
	2	55,60	56,60
	3	56,40	56,60
T3	1	49,90	57,00
	2	47,10	56,80
	3	48,10	56,80

Fonte: Do autor (2024).

Quadro 06 - Condutividade térmica - Valores individuais.

Tratamento	Corpo de prova	28 dias de cura (K)	Envelhecido (K)
T1	1	4,02	3,94
	2	3,76	4,02
	3	4,03	3,99
T2	1	4,21	4,01
	2	4,29	3,90
	3	4,11	3,97
T3	1	3,76	3,74
	2	4,36	3,93
	3	4,03	3,97

Fonte: Do autor (2024).