MARIANA DE CASTRO PINTO

Aplicação de rejeitos de fosfato na produção de tijolos de solo-cimento

ARAXÁ - MG

2023

MARIANA DE CASTRO PINTO

Aplicação de rejeitos de fosfato na produção de tijolos de solo-cimento

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação e Tecnologia de Minas Gerais, na linha de pesquisa em Processamento de Minérios e Rejeitos como parte integrante dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Minas.

ARAXÁ – MG

2023

Pinto, Mariana de Castro.
P659a Aplicação de rejeitos de fosfato na produção de tijolos de solo-cimento / Mariana de Castro Pinto – 2023.
63 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Alexander Martin Silveira Gimenez.
Coorientadores: Prof. Dr. Domingos Sávio de Resende.
Prof. Dr. Lucas Martins Guimarães.

Dissertação (mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Araxá, 2023.
Bibliografia.

1. Rejeitos de Mineração – Utilização – Teses. 2. Rocha Fosfática – Teses. 3. Tijolos de Solo-cimento – Teses. 4. Tijolos Ecológicos – Teses. I. Gimenez, Alexander Martin Silveira. II. Resende, Domingos Sávio de. III. Guimarães, Lucas Martins. V. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. V. Título.

CDU 622’17-049.7

Ficha elaborada pela Biblioteca – *Campus* Araxá – CEFET-MG
Bibliotecária: Gleisa Mara Alves CRB-6/1713

RESUMO

O beneficiamento mineral gera um alto volume de rejeitos, geralmente depositado em barragens. Essa forma de deposição desse material, pode apresentar custos elevados, impactos ambientais, sociais e situações de risco. Diante disso, as empresas de mineração vêm explorando e desenvolvendo alternativas e novas técnicas para aproveitar os rejeitos oriundos do beneficiamento do minério, tentando reduzir danos, o descarte no meio ambiente e o desperdício de materiais. Portanto, o objetivo desse trabalho foi estudar a viabilidade de utilização de rejeitos provenientes da extração e processamento de fosfato na incorporação da formulação de tijolos solo-cimento maciços, em escala reduzida, agregando valor a um subproduto da mineração aliando com a sustentabilidade. Com isto, além de uma destinação ambientalmente correta para o rejeito, espera-se propiciar material que estimula novos negócios na comunidade impactada pela atividade mineradora. E, para viabilizar este estudo, foi realizada a caracterização dos materiais e posterior determinação dos traços para a fabricação dos tijolos de solo-cimento. A caracterização das amostras foi essencial para o desenvolvimento do trabalho porque poderia haver variações da composição mineralógica, da granulometria e da composição química que interferissem nos parâmetros dos tijolos. Diante dos resultados, foram produzidos 20 tijolos para cada traço determinado, sendo 2 composições no total. Após a fabricação dos mesmos, foram realizados ensaios de resistência à compressão e de absorção de água. Como resultado, foram obtidos tijolos com alta resistência à compressão e de baixa absorção quando comparados ao especificado nas normas ABNT NBR 8491 (2012): Tijolo de solo cimento – requisitos e ABNT NBR 8492 (2012): Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio, onde cada unidade deve resistir ao valor mínimo de 1,7MPa, e a média do lote de 2,0MPa nos ensaios de resistência à compressão e no caso de absorção de água, a normativa pede um limite máximo individual de 22% e média do lote de 20%. Diante disso, foram obtidos, nos 2 traços estudados, valores médios de resistência de compressão de 5,62 MPa e 5,46 MPa, e de absorção de água, com valores médios 9,71% e de 8,50%, provando serem compatíveis com os tijolos comumente fornecidos no mercado.

Palavras-chave: Reuso de rejeitos; Rejeito de rocha fosfática; Tijolos de solo-cimento; Tijolos ecológicos.

ABSTRACT

Mineral processing generates a high volume of waste, generally deposited in dams. This form of deposition of this material can present high costs, environmental and social impacts and risk situations. Given this, mining companies have been exploring and developing alternatives and new techniques to use waste from ore processing, trying to reduce damage, disposal in the environment and waste of materials. Therefore, the objective of this work was to study the feasibility of using waste from the extraction and processing of phosphate in the incorporation of the formulation of solid soil-cement bricks, on a reduced scale, adding value to a mining by-product, combining with sustainability. With this, in addition to an environmentally correct destination for the waste, it is expected to provide material that stimulates new business in the community impacted by mining activity. And, to make this study viable, the characterization of the materials was carried out and subsequent determination of the traits for the manufacture of soil-cement bricks. The characterization of the samples was essential for the development of the work because there could be variations in the mineralogical composition, granulometry and chemical composition that could interfere with the parameters of the bricks. Given the results, 20 bricks were produced for each determined trait, 2 compositions in total. After manufacturing, compressive strength and water absorption tests were carried out. As a result, bricks with high compressive strength and low absorption were obtained when compared to those specified in the standards ABNT NBR 8491 (2012): Soil-cement brick – requirements and ABNT NBR 8492 (2012): Soil-cement brick – Dimensional analysis , determination of compressive strength and water absorption – Test method, where each unit must resist the minimum value of 1.7MPa, and the batch average of 2.0MPa in the compressive strength tests and in the case of water absorption water, the regulations require a maximum individual limit of 22% and a batch average of 20%. Therefore, in the 2 mixes studied, average values of compression resistance of 5.62 MPa and 5.46 MPa, and of water absorption, with average values of 9.71% and 8.50%, were obtained, proving to be compatible with bricks commonly supplied on the market.

Keywords: Reuse of waste; Phosphate rock waste; Soil-cement bricks; Ecological bricks.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramento aos meus pais pelo amor incondicional, pelos valores ensinados e por sempre apoiarem meus sonhos.

Aos meus irmãos, que apesar da distância física, sempre se fazem presentes.

Ao Rafael, agradeço por toda a paciência e compreensão nos momentos de ausência e de ansiedade ocorridos durante a conclusão do curso, além de todo o amor e apoio transmitido.

Aos meu orientadores Alexander Martin Silveira Gimenez, Domingos Sávio de Resende e Lucas Martins Guimarães, por todos os ensinamentos fornecidos, puxões de orelha e suporte que tornou possível a evolução deste trabalho.

Agradeço também aos professores do Programa de Mestrado em Engenharia de Minas do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais pelos conhecimentos transmitidos e pelos ensinamentos éticos dentro da profissão.

Agradeço também à Universidade Federal de Viçosa e ao Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais por ceder seus técnicos e laboratórios para que fosse possível a execução dos ensaios necessários para a conclusão deste trabalho.

Por fim, agradeço a todos amigos pelos momentos de descontração e a todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram pela superação de mais esta etapa em minha vida. Muito obrigado a todos!

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
1.1. DEFINIÇÃO E DELIMITAÇÃO DO TEMA 13
1.2. PROBLEMATIZAÇÃO 13
1.3. JUSTIFICATIVA 13
1.4. OBJETIVO GERAL 14
1.5. OBJETIVOS ESPECÍFICOS 14
2. REFERENCIAL TEÓRICO 15
2.1 PANORAMA GERAL 15
2.2 TIJOLOS DE SOLO CIMENTO 16
2.2.1 VANTAGENS E DESVANTAGENS DA FABRICAÇÃO DOS TIJOLOS ECOLÓGICOS 19
2.2.2 DIRETRIZES PARA A FABRICAÇÃO DOS TIJOLOS ECOLÓGICOS ... 21
3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS 26
3.1. PREPARATIVOS QUE ANTECEDEM A FABRICAÇÃO DOS TIJOLOS DE SOLO CIMENTO 26
3.1.1. RECEBIMENTO E PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS 26
3.1.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 27
3.1.2.1 REJEITO FINO PROVENIENTE DO BENEFICIAMENTO DE APATITA 28
3.1.2.2 REJEITO DE MAGNETITA PROVENIENTE DO BENEFICIAMENTO DA APATITA 34
3.2. FABRICAÇÃO DO TIJOLO SOLO-CIMENTO 40
3.3. DETERMINAÇÃO DOS TRAÇOS DOS TIJOLOS 40
3.3.1 TRAÇO OBTIDO ATRAVÉS DAS TRÊS GRANULOMETRIAS DE REJEITO DE MAGNETITA 41
3.3.2 TRAÇO OBTIDO ATRAVÉS DA MISTURA DE MAGNETITAS COM ADIÇÃO DE REJEITO FINO 42
3.3.3 COMPOSIÇÃO FINAL DOS 2 TRAÇOS OBTIDOS 45
3.4. MOLDAGEM DOS TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO 45
3.5 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DOS TIJOLOS SOLO-CIMENTO 47
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 49
4.1. LOTE PRODUZIDO COM O TRAÇO OBTIDO ATRAVÉS DAS TRÊS GRANULOMETRIAS DE REJEITO DE MAGNETITA 49

4.2. LOTE PROZIDO COM O TRAÇO OBTIDO ATRAVÉS DA MISTURA DE MAGNETITAS COM ADIÇÃO DE REJEITO FINO 50

5. CONCLUSÃO 52

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 55

ANEXO A 57

1. LOTE PRODUZIDO COM O TRAÇO OBTIDO ATRAVÉS DAS TRÊS GRANULOMETRIAS DE REJEITO DE MAGNETITA 57

2. LOTE PROZIDO COM O TRAÇO OBTIDO ATRAVÉS DA MISTURA DE MAGNETITAS COM ADIÇÃO DE REJEITO FINO 60

ÍNDICE DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1: Tijolos de solo-cimento vazados 17
Figura 2: Tijolos de solo-cimento maciço 18
Figura 3: Prensa modular para a fabricação de tijolos 18
Figura 4: Detalhes da alvenaria com tijolos de solo-cimento sem argamassa de assentamento 20
Figura 5: Tijolo maciço de solo-cimento 22
Figura 6: Tijolo vazado de solo-cimento 23
Figura 7: Faixa granulométrica do solo recomendado para a fabricação dos tijolos de solo-cimento, de acordo com as normas vigentes. 24
Figura 8: Exemplos de apatita obtida na extração 26
Figura 10: Execução ensaio de granulometria 30
Figura 11: Curva granulométrica do rejeito fino 31
Figura 12: Corpo de prova sendo desmoldado durante o ensaio de compactação 31
Figura 13: Curva de compactação por proctor normal 32
Figura 14: Execução dos ensaios de Limites de Atterberg 32
Figura 15: Curva obtida no ensaio de limite de liquidez 33
Figura 16: Granulometria material obtida após peneiramento 35
Figura 17: Amostras decantando para medição da densidade 36
Figura 18: Curva granulométrica do material primário recebido passante na peneira de Nº100 36
Figura 19: Curva granulométrica do material primário recebido retido na peneira de Nº100 37
Figura 20: Curva granulométrica do material primário recebido retido na peneira de Nº50 38
Figura 21: Curva de compactação por proctor normal da mistura de magnetitas 42
Figura 22: Corpos de prova obtidos após realização de ensaio Mini MCV 43
Figura 23: Execução dos ensaios de Limites de Atterberg 44
Figura 24: Curva de compactação obtida através de ensaio Mini MCV 44
Figura 25: Molde utilizado para a fabricação dos tijolos de solo cimento 46
Figura 26: Prensa CBR atuando sobre o molde7 46
Figura 27: Tijolos realizados através do molde adaptado 47

Figura 28: Amostras preparadas para ruptura..... 48
Figura 29: Ruptura dos corpos de prova através de prensa universal 49
Figura 30: Resultado corpo de prova 1 de 7..... 57
Figura 31: Resultado corpo de prova 2 de 7..... 57
Figura 32: Resultado corpo de prova 3 de 7..... 58
Figura 34: Resultado corpo de prova 5 de 7..... 59
Figura 37: Resultado corpo de prova 1 de 7..... 60
Figura 38: Resultado corpo de prova 2 de 7..... 61
Figura 41: Resultado corpo de prova 5 de 7..... 62
Figura 42: Resultado corpo de prova 6 de 7..... 63

1 INTRODUÇÃO

Segundo Savi, Filho e Savi (2006), o setor industrial é um dos maiores responsáveis pela degradação ambiental, haja vista a questão de que seus processos geram grande quantidade de resíduos e muitas vezes são lançados ao meio ambiente sem o tratamento adequado.

Dentro desse cenário, encontra-se a Indústria da Mineração em geral, que é destacada por Araújo, Santos e Ferreira (2012) como sendo uma área indispensável para a economia do país e configura o alicerce da cadeia produtiva, uma vez que os produtos através da mineração estão presentes no dia a dia da sociedade de maneira expressiva e praticamente de forma substancial.

Segundo Severo (2019) ainda que a mineração seja de extrema importância para a economia, ela é alvo de constante debate devido ao fato de explorar recursos naturais não renováveis e, além disso, segundo Araújo, Santos e Ferreira (2012), a mineração tem capacidade de propiciar numerosos impactos ambientais negativos que influenciam direta ou indiretamente o homem.

Para se obter um mineral mais concentrado e mais competitivo internacionalmente, é necessário que ele passe primeiro pelo processo de beneficiamento. Esse processo consiste em separar o material valioso do rejeito, que não apresenta interesse econômico e que normalmente é disposto em barragens (VALE, 2016).

De acordo com o Código Brasileiro de Mineração (1967), estéril consiste no material descartado diretamente na operação de lavra (conjunto de operações que possuem o objetivo de aproveitar industrialmente uma jazida), sem ser processado na usina de beneficiamento. Já o rejeito corresponde à porção associada ao minério descartada durante e/ou após o processo de beneficiamento do minério.

Esses rejeitos causam muitos danos ao meio ambiente, o que torna importante a busca por alternativas de utilização dos mesmos, uma vez que depositá-los em barragens não é adequado e seguro, sem contar seu potencial de contaminação do solo e águas superficiais e subterrâneas, e dos elevados riscos de acidentes.

Como consequência, de acordo com a Casa Civil do governo do Brasil, a Resolução nº 85/2021, que estabelece as regras para o reaproveitamento de rejeitos da mineração, foi aprovada em dezembro de 2021 pela Diretoria Colegiada da Agência Nacional de Mineração (ANM), vinculada ao Ministério de Minas e Energia (MME). O

texto representa um passo fundamental no aumento da sustentabilidade e do uso mais racional do patrimônio mineral do nosso país.

A Resolução reitera, sem margem para dúvidas, sobre a posse de rejeitos e estéreis, ao estabelecer que fazem parte da mina onde foram gerados, ainda que a lavra esteja suspensa ou o direito minerário onde ela se encontra esteja em disponibilidade para novos interessados.

Ainda, o novo dispositivo legal também estende, para os rejeitos e estéreis que sejam aditados como nova substância ao direito minerário da sua mina de origem, o benefício de redução para metade da alíquota vigente da Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais (CFEM), royalty da mineração. Outro ponto importante é a obrigatoriedade de que todos os procedimentos ambientais e de segurança já em vigor sejam observados para o reaproveitamento de rejeitos de barragens de mineração.

Não encontrar uma rota de beneficiamento mineral, não significa, necessariamente, que este material não possa ser aproveitado pelo mercado consumidor. Sendo assim, a incorporação do estéril ou rejeito de minério como matéria prima para materiais alternativos da construção civil pode ser uma possibilidade viável para a redução dos passivos ambientais causados pela disposição desses elementos em barragens (GOMES, A. C. F. 1 , ROCHA, S.D.F. 2 (2019)).

Para Borges (2008), o conhecimento dos rejeitos viabiliza o aproveitamento como subproduto na própria usina ou em diversos outros segmentos, como o industrial ou do ramo da construção, tornando possível seu reuso, diminuindo o impacto ambiental e criando receita no lugar de despesas para realizar o armazenamento ou gestão desse resíduo.

A mineração é o setor industrial que extrai os recursos minerais, ao passo que a construção civil é um dos maiores consumidores desses bens. Domingues (2015) estima que 50% de todos os recursos minerais mundiais são destinados para a construção civil; e o consumo elevado desses recursos também gera fortes impactos ambientais.

No momento atual, segundo Gomes (2021), em busca por empreendimentos sustentáveis, observa-se o maior uso de técnicas de construção mais adaptáveis ao ambiente, com tecnologias consideradas menos nocivas ao habitat e que empregam eco materiais.

Neste contexto, visando adotar práticas que incorporem a bioconstrução e a economia circular, estudos que envolvem a fabricação de tijolos solo-cimento, também conhecidos como tijolos ecológicos, vem sendo conduzidos.

Segundo a Aniteco - Associação Nacional do Tijolo Ecológico (2021), os tijolos de solo-cimento são chamados também de tijolos ecológicos por permitirem, em sua composição, o uso de areia, de resíduos e escória de usinas siderúrgicas, de agregados reciclados de entulho de construção civil, de resíduos de atividades mineradoras e outros passivos ambientais resultantes de atividades variadas, que no processo se tornam componentes agregados através do emprego de cimento e água que, submetidos à pressão e ao processo de cura, geram peças padronizadas e altamente resistentes, compatíveis com as peças disponíveis no mercado.

Ainda, segundo a Aniteco - Associação Nacional do Tijolo Ecológico (2021), por não usar o barro vermelho, matéria-prima tradicional dos tijolos convencionais, evita-se também a degradação do meio ambiente causada por sua extração. Outra grande vantagem referente à questão ecológica é que o processo de produção dos tijolos não necessita de fornos, o que gera uma grande economia energética e evita que muitas florestas sejam destruídas para a obtenção da lenha utilizada neste processo.

Além disso, é interessante destacar que o trabalho consegue contribuir com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável de números 9 e 12, que discute sobre o do desenvolvimento da indústria, da infraestrutura, da inovação, da geração de valor e que visa alcançar uma gestão, produção e consumo sustentável e eficiente dos recursos naturais.

Sendo assim, inicialmente, para a definição desse trabalho, foi feito um levantamento com relação a estudos já realizados sobre a utilização de diferentes tipos de rejeitos, buscando embasamento teórico para a elaboração do projeto e escolha de um possível material que trará bons resultados dentro dos objetivos previstos de fabricação dos tijolos de solo-cimento em adição ao subproduto da mineração.

Dentre os diversos rejeitos estudados, estão aqueles de minério de ferro, apatita, fosfato, ardósia, calcário, manganês, ouro, entre outros. Por fim, foram escolhidos dois rejeitos provenientes da extração e beneficiamento do minério de apatita, extraindo fosfato nos processos finais, da mineradora Mosaic, do Complexo Mineroquímico de Araxá, em Minas Gerais, e que permitirá a avaliação de sua aplicabilidade na fabricação de tijolos de solo - cimento. Para tal, é necessária a realização de uma caracterização dos materiais a serem utilizados, buscando a obtenção de maiores informações sobre os mesmos.

1.1. Definição e delimitação do tema

Segundo Silva et. al (2017) a constante preocupação com a responsabilidade social e a sustentabilidade faz com que as organizações e empresas desenvolvam medidas para avaliação do desempenho ambiental acreditando que, ao adotar práticas mais sustentáveis, os ganhos futuros serão maiores e a degradação do meio ao entorno menor.

Segundo a Aniteco - Associação Nacional do Tijolo Ecológico (2021), a busca por técnicas construtivas que minimizem os impactos ambientais ocasionados pela construção, da extração da matéria prima para a fabricação de seus elementos, é o maior desafio dos profissionais e da indústria da construção civil na atualidade. Diante disto, a redução do desperdício, a busca pela eficiência dos processos construtivos e o aprimoramento das tecnologias aplicáveis à construção civil também são fatores de constante empenho em um mercado altamente competitivo.

Em adendo, atualmente nota-se uma crescente demanda de minérios, o que resulta em um consequente aumento na dimensão das barragens e pode ocasionar elevação nos custos de produção. Infelizmente algumas empresas buscam redução de tais custos e utilizam tais estruturas de contenção de forma inadequada, podendo ocasionar acidentes e rupturas. Além disso, licenciamentos ambientais passam a ser mais difíceis de serem obtidos, devido aos impactos ambientais, visuais e situações de risco gerados pela construção de barragens (SEVERO, 2019)

Ainda, de acordo com a Casa Civil do governo do Brasil, foi aprovada a Resolução nº 85/2021, que estabelece as regras para o reaproveitamento de rejeitos da mineração.

Sendo assim, são necessários estudos avaliando novas formas de reduzir o volume de rejeitos estocados. Neste contexto surge o aproveitamento de rejeitos, buscando a transformação destes em materiais aproveitáveis, com valor agregado, além de benefícios ambientais e vantagens econômicas para as indústrias (SILVA, 2014; MACHADO, 2018).

1.2. Problematização

Com base no exposto, pode-se concluir que existe uma necessidade de reduzir o volume de rejeitos e/ou resíduos estocados pela indústria da mineração, o que fomenta a busca de formas de se aproveitar este material e de agregar valor a este subproduto.

1.3. Justificativa

Neste contexto surge o aproveitamento de rejeitos, buscando a transformação destes em materiais aproveitáveis, com valor agregado, além de benefícios ambientais e vantagens econômicas para as indústrias.

Diversas soluções são propostas a cada dia e dentre elas, uma para minimizar este problema, é a fabricação de tijolos tipo solo-cimento, também conhecidos como tijolos ecológicos, utilizando materiais secundários proveniente de rejeitos de mineração.

Diante disto, foi realizada a pesquisa de qual subproduto poderia atender as exigências normativas para a fabricação do tijolos solo-cimento e que poderia obter boa resistência à compressão e baixa absorção de água.

1.4. Objetivo geral

O objetivo deste projeto é verificar a possibilidade de fabricação de um tijolo, fabricado com cimento Portland e com rejeitos provenientes da mineração, com propriedades físicas e mecânicas compatíveis com as exigências das normas ABNT NBR 8491 (2012): Tijolo de solo cimento – requisitos e ABNT NBR 8492 (2012): Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio, além de atender as características dos tijolos fornecidos comumente no mercado.

1.5. Objetivos específicos

- Caracterizar os rejeitos provenientes da mineração que serão utilizados para a fabricação dos tijolos solo-cimento e determinar os traços para os tijolos de solo-cimento;
- Produzir tijolos maciços de solo-cimento com substituição total do solo por rejeitos provenientes da mineração de fosfato, em escala reduzida;
- Realizar ensaios nos tijolos produzidos para obtenção de parâmetros de resistência à compressão e de absorção de água; comparar os parâmetros obtidos através dos ensaios com as exigências da norma NBR 8492 (2012): Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio; comparar também os resultados obtidos entre os tijolos com diferentes traços.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Panorama geral

Segundo a Agência Nacional de Mineração (2019), a produção mineral gera um grande volume de rejeitos ou estéril após o beneficiamento de minérios, tendo algumas barragens no Brasil que possuem capacidades superiores a 3 milhões de metros cúbicos. Esse problema é agravado no processamento de alguns minérios, como: ouro, cobre, fosfato, carvão e ferro, que produzem um volume maior deste subproduto. A deposição de tais rejeitos é feita geralmente em barragens, que devem seguir exigências de funcionamento, de segurança e de proteção ao meio ambiente. (SOARES, 2010).

Soares (2010) destaca que o rejeito é definido como a parte do minério que não possui valor econômico agregado, sendo resultado das etapas de beneficiamento da mineração. Portanto, os rejeitos apresentam características variáveis de acordo com o tipo de minério e processos aplicados para sua extração.

Bates (2002) menciona que os rejeitos geralmente encontrados no Brasil podem ser divididos em areia, areia natural e silte; lama ou mica; argila; pedras e seixos; solos de decapeamento e turfa.

Soares (2010) destaca que a disposição adequada de rejeitos pode gerar aumentos nos custos de produção do minério. No entanto, é necessário realizar caracterização e controle de compactação dos materiais utilizados na construção de barragens, bem como dos materiais usados em seus alteamentos, evitando materiais com alto volume de água, que podem causar liquefação e/ou colocar em risco as estruturas.

Machado (2018) destaca que a deposição de rejeitos pode resultar em impactos ambientais, visuais e, ainda, gerar situações de risco, além de apresentar custos elevados de manutenção e demandar monitoramento constante para seu funcionamento e segurança.

Diante do exposto, Rubio, Oliveira e Silva (2010) apontaram que o tratamento eficiente dos rejeitos gerados, assim como sua reciclagem e reaproveitamento, são essenciais para indústrias que buscam a aceitação de seus produtos no mercado internacional e que buscam agregar valor a este subproduto. Por isso surge o aproveitamento de rejeitos, que, segundo Menezes et al (2009), tem por objetivo a transformação destes em materiais aproveitáveis, buscando reintroduzi-los no ciclo produtivo, resultando na redução de custos, consumo de matérias-primas e gastos em

diversos outros setores.

O principal setor a ser aplicado seria a construção civil, por se tratar de uma área de grande consumo de recursos naturais (MACHADO, 2018). Sendo assim, a aplicação de rejeitos na construção civil pode ser muito útil na redução do volume estocado nestas barragens e na minimização de impactos ambientais causadas pelas mesmas (FERNANDES et al, 2004).

Segundo a Geoscan (2020), não é de hoje que tanto mineradoras quanto diversos pesquisadores e estudantes das faculdades realizam pesquisas com o objetivo de realizar a reutilização de rejeitos na mineração, contudo, um grande diferencial hoje em dia, devido ao pleno desenvolvimento tecnológico nos últimos anos, conseguimos observar uma maior dedicação a esse tema e mais tentativas de tentar fazer com que isso realmente passe a acontecer em larga escala, dando mais sustentabilidade a mineração

São citados pela Geoscan (2020) algumas das aplicações mais comuns já desenvolvidas para os resíduos da mineração são:

- Finos de ferro: Para siderúrgicas e para a construção civil;
- Resíduos finos de rochas ornamentais: Como argamassas, cerâmicas vermelhas (tijolos e telhas), vidro, tintas, manilhas, corretivos de solo e outros;
- Resíduos grossos de rochas ornamentais: Para fábricas de cimento, brita e areia artificial, artesanato, seixos ornamentais, bijuterias, muros de contenção de talude, pavimentação, filetes para muros e outros.

Diante disso, nota-se a grande variedade na aplicabilidade obtida para os diferentes tipos de materiais. Com tudo isso, o reaproveitamento de rejeitos na mineração vem sendo testado para vários usos e diversas tecnologias estão sendo desenvolvidas para que a reutilização desse rejeito seja cada vez mais comum.

2.2 Tijolos de solo cimento

Segundo a Aniteco - Associação Nacional do Tijolo Ecológico (2021), a cada dia a utilização de resíduos da construção civil, industrial e mineralógica ganha mais espaço na construção modular e ecológica, com aplicações tão variadas que vão de conjuntos habitacionais de interesses sociais, a residências de alto padrão, além de tantos outros tipos de construções, inclusive de instalações industriais e comerciais com estilos e portes diversos.

Diante disso, a construção com as modernas técnicas dos Blocos Modulares de

Solo-cimento vem sendo merecidamente reconhecida como uma alternativa sustentável que alia simplicidade com eficácia e vantagens competitivas consideráveis ao se comparar com outras técnicas usuais de construção com alvenarias, como maiores níveis de eficiência energética, econômica, social e ecológica, além de excelente desempenho de segurança e estética (ANITECO, 2021)

Segundo a Aniteco - Associação Nacional do Tijolo Ecológico (2021), os tijolos e blocos de solo-cimento são comumente chamados tijolos ecológicos, dentro e fora do Brasil, devido ao fato de não ser necessário o uso de fornos para a sua fabricação, o que, além de gerar economia energética, reduz as emissões de gases poluente e evita o desmatamento para a obtenção de lenha usada durante o processo. Em adição, esses tijolos permitem que resíduos industriais sejam incorporados na sua composição, sem ter perda em suas características físicas e mecânicas

A ABNT NBR 8491 (2012): Tijolo de solo cimento – requisitos, define como tijolo de solo-cimento um componente de alvenaria, maciço ou vazado, constituído de uma mistura homogênea, compactada e endurecida de solo, cimento Portland, água e, eventualmente, aditivos e/ou pigmentos em proporções que permitam atender aos requisitos desta norma e devem ser fabricados de acordo com a norma ABNT NBR 10833 (2012): Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - procedimento. Se o tijolo possuir volume igual ou superior a 85% do seu volume total aparente, ele é denominado tijolo maciço de solo-cimento; já, se o seu volume for inferior aos 85% do total aparente, ele é chamado de tijolo vazado de solo-cimento.

Nas Figuras 1 e 2 é possível visualizar alguns exemplos de tijolos de solo-cimento

Figura 1: Tijolos de solo-cimento vazados

Fonte: Sahara (2021)

Figura 2: Tijolos de solo-cimento maciço

Fonte: Arquivo pessoal

Segundo Severo (2019) o primeiro equipamento, ou prensa, de que se tem registro para a fabricação de tijolos de solo-cimento foi desenvolvido no centro de pesquisa Cinva, na Colômbia, em meados dos anos 50, e chamado de Cinva-Ram, tendo permitido a produção de tijolos em terra crua de forma mais acelerada. Hoje, as prensas podem ser, além de manuais, hidráulicas, permitindo um processo inteiramente automatizado.

Na Figura 3, é possível observar um exemplo de prensa modular utilizada na fabricação de tijolos de solo-cimento.

Figura 3: Prensa modular para a fabricação de tijolos

Fonte: Sahara (2021)

2.2.1 Vantagens e desvantagens da fabricação dos tijolos ecológicos

Além de vantagens ambientais, segundo Severo (2019) a fabricação dos tijolos ecológicos promove uma maior oportunidade local, pois, além das matérias-primas utilizadas para a produção dos tijolos geralmente se encontrarem próximas aos locais de produção, a técnica é de fácil execução, com equipamentos baratos e não exige mão de obra especializada.

Ainda, segundo a Aniteco - Associação Nacional do Tijolo Ecológico (2021) e Ecoterm (2021), a construção com a utilização do tijolo ecológico pode trazer diversos outros benefícios, como:

- Economia de até 50% com concreto e 60% com ferragens para a sustentação estrutural da edificação;
- Economia de até 100% com madeira para a armação de formas estruturais de vigas, colunas e vergas;
- Economia de 100% em cimento e agregados em argamassas para o assentamento dos tijolos, dado que os Tijolos Modulares são auto ajustáveis e autotravantes por encaixes perfeitos entre as peças;
- Economia de 100% em cimento e agregados em argamassas de revestimento para regularização e acabamento das paredes internas e externas. É feito apenas o rejuntamento dos tijolos, que se conformam em aspectos físicos regulares;
- Economia de materiais de acabamento e de efeito cosmético, já que os tijolos modulares apresentam padrão estético decorativo;
- Economia de 40% ou mais com a mão de obra, já que a metodologia construtiva com tijolos modulares de solo-cimento dispensa mão de obra especializada. Os módulos autotravantes alinham-se automaticamente na montagem;
- Economia de tempo para a conclusão acelerada da obra, já que aumenta a velocidade da construção em até dez vezes, refletindo entre outras na economia de alocação e mobilização de mão de obra;
- Economia superior a 15% com material (tijolo) dado a redução do desperdício por quebra, considerando-se a maior resistência mecânica dos tijolos modulares de solo-cimento em comparação com os blocos de concreto e os tijolos cerâmicos;
- Economia com mão–de-obra e materiais para as instalações elétricas e hidráulicas da edificação, dado que os furos internos dos tijolos são condutores para a rede

hidráulica e elétrica (fios elétricos e canos de água passam por dentro das paredes eliminando o procedimento de quebrar as paredes para passar os conduítes), como é necessário em casos de construção com materiais ordinariamente utilizados (tijolos cerâmicos e blocos de concreto);

- Economia total no final da obra entre 40% a 50%;
- Economia de energia para a modulação e controle climático e acústico de ambientes edificados com os Tijolos Modulares de Solo-Cimento, já que os furos dos tijolos formam proteção térmica e acústica (o som que vem de fora se torna reduzido e a temperatura da interna da casa sempre é amena).
- Revestimento direto sobre o tijolo, como textura, gesso, Graffiato ou reboco;
- Assentamento dos azulejos direto sobre os tijolos;
- Não há desperdícios – no método convencional, 1/3 dos materiais vai para o lixo;
- Mais facilidade e agilidade no assentamento, até 30% menos tempo de construção;
- Obra mais limpa e sem entulhos;
- Economia de concreto, argamassa de assentamento e ferragem – com as colunas de concreto armado embutidas, o peso da obra é distribuído uniformemente sobre as paredes;
- Alivia o peso sobre a fundação, evitando gastos desnecessários com estacas mais profundas e sapatas maiores.

Na Figura 4 é possível visualizar uma construção sendo realizada com o tijolo de solo-cimento, com destaque na organização e limpeza da obra.

Figura 4: Detalhes da alvenaria com tijolos de solo-cimento sem argamassa de assentamento

Fonte: Ecoterm (2021).

Além disto, segundo a Aniteco - Associação Nacional do Tijolo Ecológico (2021), os tijolos ecológicos obtiveram resistência, durabilidade e aprimoradas tecnologias construtivas, além de excelente desempenho de segurança e estética quando comparados a outras técnicas usuais de construção em alvenarias.

Ainda, segundo a Aniteco - Associação Nacional do Tijolo Ecológico (2021), a adição de cimento ao solo permite obter um material com características que lhe conferem qualidades superiores a outros materiais ordinariamente utilizados em construção de alvenarias:

- Menor absorção e a perda de umidade do material não causam variações volumétricas consideráveis;
- Maior resistência à umidade, dado que o material não se deteriora quando submerso na água;
- Grande resistência à compressão, que é ainda aumentado quando o material é aplicado em situação de grande exposição à umidade ou mesmo de submersão;
- Material mais durável devido a uma menor permeabilidade;
- Excelente desempenho térmico e acústico;
- Padronização de formatos;
- Menores custos relativos e menores impactos ambientais em sua produção e utilização.

Por outro lado, segundo Pereira (2020), o tijolo ecológico possui algumas desvantagens como:

- Não pode ser usado como alvenaria estrutural;
- Preço unitário mais alto do que o tradicional;
- Baixa disponibilidade de fornecedores – a distância pode aumentar o preço e o impacto ambiental do frete;
- Absorve mais umidade, necessitando uma atenção maior em impermeabilização
- Baixa resistência a impactos em quinas e cantos;
- Falta de padronização e uniformidade entre os fornecedores presentes no mercado;
- Baixa produtividade, por ser um trabalho manual.

2.2.2 Diretrizes para a fabricação dos tijolos ecológicos

Algumas das exigências da norma ABNT NBR 8491 (2012): Tijolo de solo

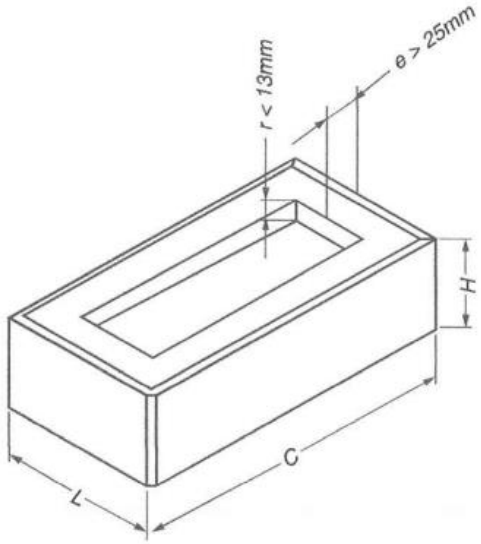
cimento – requisitos, demonstradas nas Figuras 5 e 6, são que o tijolo deve possuir a forma externa de um paralelepípedo retangular, sendo o comprimento do tijolo (C) sua maior dimensão de face de assentamento, seguido pela sua largura (L) que deve ser sua menor dimensão de face de assentamento e sempre maior que a altura (H), que é a distância entre as faces de assentamento e, ainda, as reentrâncias (r), a espessura mínima das paredes (e) e distância mínima entre furos (d) devem respeitar as delimitações apresentadas. Suas dimensões nominais devem atender as constantes na Tabela 01, com tolerância de ± 1,00 mm para o comprimento (C), largura (L) e altura (H).

Tabela 01: Tipos e dimensões nominais tijolos de solo-cimento

Tipos	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
A	200	100	50
B	240	120	70

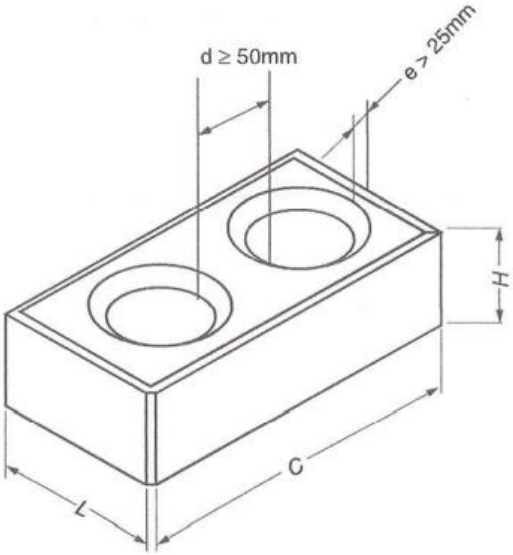
Fonte: ABNT NBR 8491 (2012): Tijolo de solo cimento – requisitos

Figura 5: Tijolo maciço de solo-cimento



Fonte: ABNT NBR 8491 (2012): Tijolo de solo cimento – requisitos

Figura 6: Tijolo vazado de solo-cimento



Fonte: ABNT NBR 8491 (2012): Tijolo de solo cimento – requisitos

Ainda, existem alguns parâmetros que devem ser observados na fabricação de tijolos ecológicos como a pressão de prensagem, o tipo de solo e a sua distribuição granulométrica, o tipo e a quantidade de estabilizante, o teor de umidade e as condições de cura (HALLAL, SADE e NAJJAR., 2018). De uma forma geral, quanto maior a pressão de prensagem do solo, maior a compactação e maior será a resistência à compressão do tijolo formado

E, para que estes tijolos possam ser comercializados no Brasil, eles devem atender a ABNT NBR 8491 (2012): Tijolo de solo cimento – requisitos, que determina valores dimensionais, de resistência à compressão e de absorção de água admissíveis para estes componentes de alvenaria. Além disto, a norma ABNT NBR 8491 (2012): Tijolo de solo cimento – requisitos, estabelece que o tijolo deve ter arestas vivas e não pode apresentar fissuras, fraturas ou outros defeitos que possam comprometer o assentamento, a resistência e a durabilidade da alvenaria.

De acordo com norma técnica brasileira ABNT NBR 8491 (2012): Tijolo de solo cimento – requisitos, a unidade de compra é o tijolo individual ou o milheiro (mil tijolos). O lote é aprovado se os tijolos, atendem ao especificado na mesma norma: parâmetro resistência à compressão, cada unidade deve resistir ao valor mínimo de 1,7MPa, e a média do lote de 2,0MPa; absorção de água, a normativa pede um limite máximo individual de 22% e média do lote de 20%, ambos com idade mínima de 7 dias; Esta média é obtida na inspeção que deve ser feita a cada produção superior a 10000 unidades,

com a retirada de 10 aleatórias que serão testadas.

Para a obtenção desses parâmetros, segundo a ABNT NBR 10833 (2012): Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – procedimento, o solo recomendado para a fabricação do tijolo de solo-cimento são os que possuem as características descritas a seguir:

Passando na peneira ABNT 4,75mm (Nº4) ---------- 100%

Passando na peneira ABNT 0,075mm (Nº200) ---------- 10 a 50%

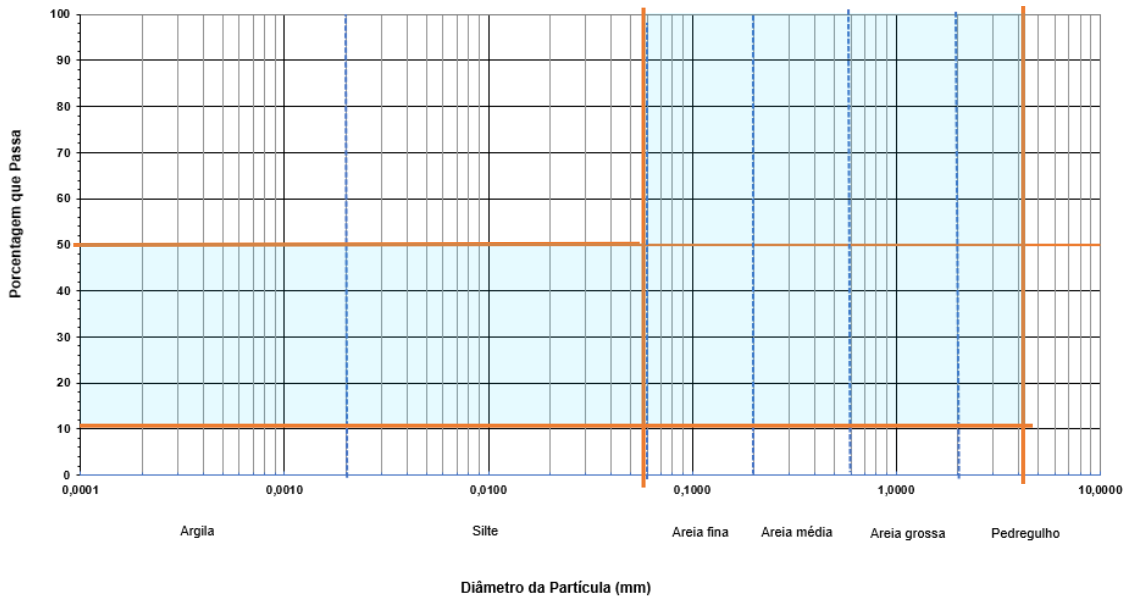
Limite de Liquidez ---------- ≤ 45%

Índice de Plasticidade ---------- ≤ 18%

Ainda, em adendo as informações contidas na norma ABNT NBR 10833 (2012): Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – procedimento, de acordo com a fabricante de prensas para a fabricação dos tijolo de solo-cimento, Sahara, a mistura ideal deve ser composta por um solo arenoso contendo entre 70% a 80% de areia, adicionado a um outro material com cerca de 20 a 30% de solo argiloso, e 12 a 15% de cimento.

Na Figura 7 é possível visualizar a faixa granulométrica exigida para a fabricação do solo-cimento de acordo com a norma ABNT NBR 10833 (2012): Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – procedimento

Figura 7: Faixa granulométrica do solo recomendado para a fabricação dos tijolos de solo-cimento, de acordo com as normas vigentes.



Fonte: Arquivo pessoal

Contudo, ademais desses indicadores, conhecer as características dos rejeitos é necessário, pois variações da composição química, mineralógica, granulométrica, assim como características de periculosidade são intrínsecos a cada rejeito e podem produzir tijolos com aspectos distintos (ZHANG, 2013). Em adição, cada vez mais se espera que os materiais de construção desempenhem múltiplas funções, sejam duráveis e sustentáveis.

3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Foram estudados diversos rejeitos que possivelmente se enquadrariam nos requisitos citados e, diante do exposto, foi escolhido, como resíduos potenciais para a execução do trabalho, rejeitos provenientes da extração e beneficiamento do minério de apatita (Figura 8), extraindo fosfato nos processos finais.

Durante o processo de beneficiamento desse mineral, são produzidos alguns rejeitos, dos quais dois foram estudados nesse trabalho.

Os rejeitos foram fornecidos pela Mosaic do Complexo Mineroquímico de Araxá, em Minas Gerais, que permitiram a avaliação de suas aplicabilidades na fabricação de tijolos de solo - cimento. Para tal, foi necessária a realização de uma caracterização mineral, buscando a obtenção de maiores informações sobre os mesmos.

Após a caracterização dos materiais, foi possível dar prosseguimento na fabricação dos tijolos de solo-cimento.

Figura 8: Exemplos de apatita obtida na extração

Fonte: Museu de Geologia e Ciências Naturais (2021)

3.1. Preparativos que antecedem a fabricação dos tijolos de solo cimento

3.1.1. Recebimento e preparação das amostras

A amostragem das pilhas dos rejeitos e estéreis precede a caracterização de material e abrange uma sequência de operações que objetiva a obtenção de amostras que sejam representativas e que serão avaliadas para o seu uso na composição dos tijolos de solo-cimento.

A amostragem realizada nas pilhas de rejeitos da barragem proveniente da extração e beneficiamento do minério de apatita, do Complexo Mineroquímico da região do Alto Paranaíba, em Minas Gerais, foi realizada pela própria mineradora

Sendo assim, foram fornecidos dois tipos de rejeitos para a realização deste trabalho, obtidos durante o processo de beneficiamento do minério de apatita. O primeiro foi um material com alta porcentagem de finos, misturado com um grande volume de água, obtido na saída dos dutos de envio do mesmo para as barragens, após beneficiamento e outro conhecido como magnetita, coletado nas pilhas de rejeitos após a realização de separação magnética durante os primeiros estágios de beneficiamento. Esse segundo rejeito foi utilizado anteriormente para o trabalho de outro aluno, onde foi realizada uma divisão granulométrica, visando fazer um comparativo de resultados com a areia tradicional.

Diante disso, no caso do primeiro rejeito, o rejeito foi transportado para os laboratórios através de bombonas, onde, para a obtenção dos sólidos, os materiais foram decantados, tiveram seu excesso de água retirados e foram secos em estufa a 100ºC e, posteriormente, preparados para a caracterização dos materiais, onde foram realizados diversos ensaios para este fim. Ainda, no caso do rejeito magnético, ele foi recebido em três granulometrias, retidos na peneira #50, retidos na peneira #100 e passantes na #100. Sendo assim, para cada tipo de procedimento nesta etapa, a amostra foi preparada de acordo com as normas regentes, ou seja, para cada ensaio de laboratório que será realizado, o solo terá uma preparação diferente.

3.1.2. Caracterização dos materiais

Para caracterização de ambos os rejeitos e das misturas definidas para a fabricação dos tijolos, foram realizados os ensaios de:

- Análise granulométrica por peneiramento, de acordo com a norma ABNT NBR 7181 (2016): Solo – Análise Granulométrica, que prescreve o método para a análise da granulometria do material, realizada por peneiramento ou por combinação de sedimentação e peneiramento;
- Análise química através da espectrometria por fluorescência de raios X, de acordo com a norma ABNT NBR 16137/2016: Ensaios não destrutivos – Identificação de materiais por teste por pontos, espectrometria por fluorescência de raios X e

espectrometria por emissão óptica, que possibilita a identificação e quantificação da concentração de elementos químicos da estrutura do material. A técnica utiliza de raios-X, em que se é observado a energia da onda emitida pelo átomo que é atingido por uma partícula carregada, uma vez que já é amplamente conhecido as radiações características emitidas por cada elemento quando submetidos a essa solicitação.

- Limites de plasticidade e de liquidez, de acordo com as normas ABNT NBR 7180 (2016): Solo – Determinação do limite de Plasticidade e ABNT NBR 6459 (2016): Solo – Determinação do limite de Liquidez, que permitem determinar os limites de consistência do solo, para descrever o grau de ligação entre as partículas das substâncias.
- Determinação da massa específica, de acordo com a norma ABNT NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica, que visa determinar a massa específica das partículas sólidas do solo.
- Avaliação da densidade aparente seca máxima e do teor de umidade ótimo correspondente à energia normal de compactação das misturas, de acordo com a norma ABNT NBR 7182 (2016): Solo – Ensaio de Compactação ou, quando não possível pela pouca quantidade de material, esse parâmetro foi obtido através de ensaio de compactação MINI MCV, de acordo com a norma DNER-ME 258/94: Solos compactados em equipamento miniatura - Mini- MCV – Método de ensaio. Estes ensaios permitem calcular a umidade ótima de compactação e também a densidade aparente seca máxima em um determinado volume.

Todos os ensaios foram realizados no laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade Federal de Viçosa – Campus Rio Paranaíba e no laboratório de solos do Centro Federal de Educação Tecnológica – Campus Belo Horizonte.

3.1.2.1 Rejeito fino proveniente do beneficiamento de apatita

Para a caracterização desse material primário, foram realizados os ensaios de análise granulométrica por peneiramento, de acordo com a norma ABNT NBR 7181 (2016): Solo – Análise Granulométrica, análise química através da espectrometria por fluorescência de raios X, de acordo com a norma ABNT NBR 16137/2016: Ensaios não destrutivos – Identificação de materiais por teste por pontos, espectrometria por fluorescência de raios X e espectrometria por emissão óptica; limites de plasticidade e de liquidez, de acordo

com as normas ABNT NBR 7180 (2016): Solo – Determinação do limite de Plasticidade e ABNT NBR 6459 (2016): Solo – Determinação do limite de Liquidez; determinação da massa específica, de acordo com a norma ABNT NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica, que visa determinar a massa específica das partículas sólidas do solo e avaliação da densidade aparente seca máxima e do teor de umidade ótimo correspondente à energia normal de compactação das misturas, de acordo com a norma ABNT NBR 7182 (2016): Solo – Ensaio de Compactação. Os resultados obtidos podem ser visualizados na sequência

Nas Figuras 9 e 10 apresenta-se fotos do resultado do peneiramento e da execução do ensaio de granulometria, onde é possível ver a quantidade de material retido de acordo com a malha de cada peneira, o conjunto de peneiramento e material com defloculante misturado em água, sendo aferido pelo densímetro.

Figura 9: Resultado peneiramento amostra, após ensaio

Fonte: Arquivo Pessoal

Figura 9: Execução ensaio de granulometria

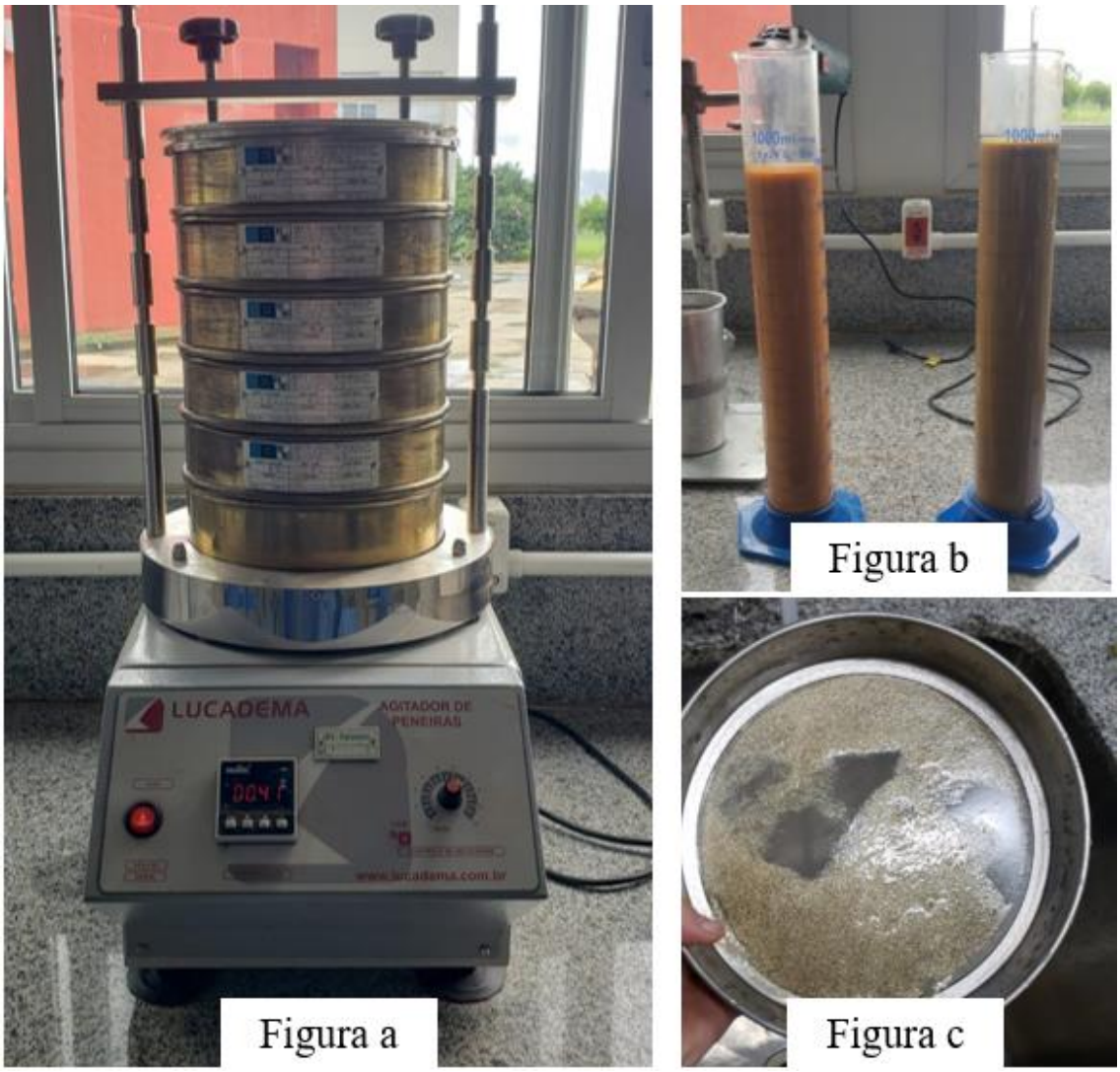
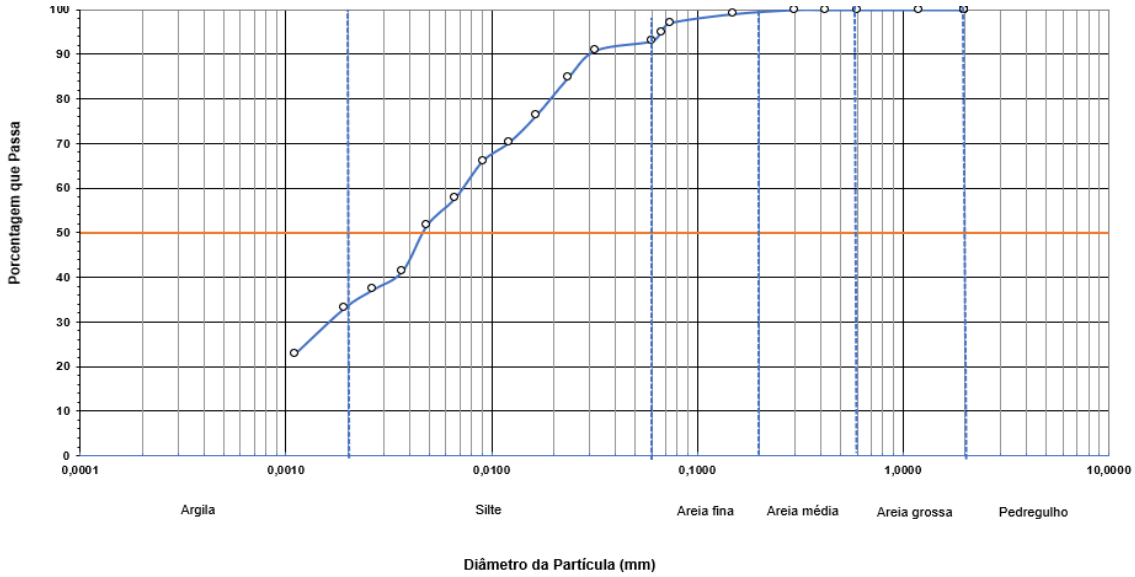


Figura a: Plataforma vibratória com o conjunto de peneiras; Figura b: Amostra sendo aferida pelo densímetro; Figura c: Material retido na peneira nº 200 após lavagem

Fonte: Arquivo pessoal

Na Figura 11 está apresentada a curva granulométrica do rejeito fino.

Figura 10: Curva granulométrica do rejeito fino



Fonte: Arquivo pessoal

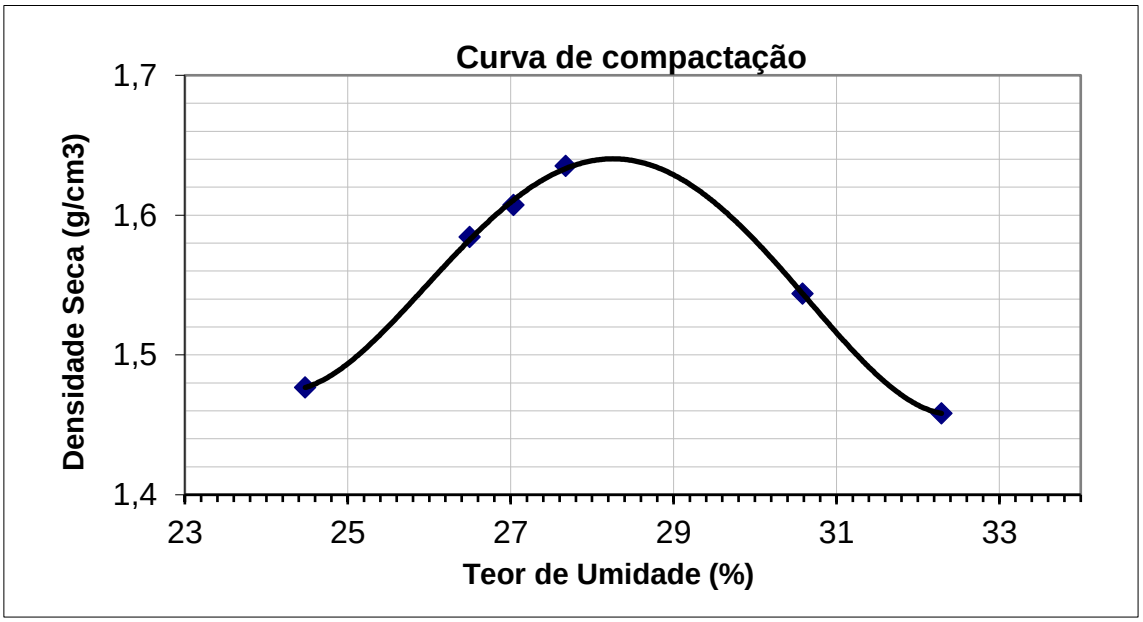
Este material é classificado de acordo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) como ML (Siltes de baixa plasticidade).

Já na Figura 12 está apresentada uma foto da realização do ensaio de compactação e na Figura 13 está apresentada a curva de compactação, obtida com energia do Proctor Normal.

Figura 11: Corpo de prova sendo desmoldado durante o ensaio de compactação

Fonte: Arquivo pessoal

Figura 12: Curva de compactação por proctor normal



Fonte: Arquivo pessoal

Diante desse gráfico, é possível observar que pelo método de compactação por proctor normal, o ɣd máximo obtido foi de 1,64 g/cm³, com uma umidade ótima em torno de 28,3%. Isso significa, que nesse método, com a umidade próxima a esse valor, pode-se compactar o solo de forma que fique 1,64 gramas de material seco por cm³ de volume de molde.

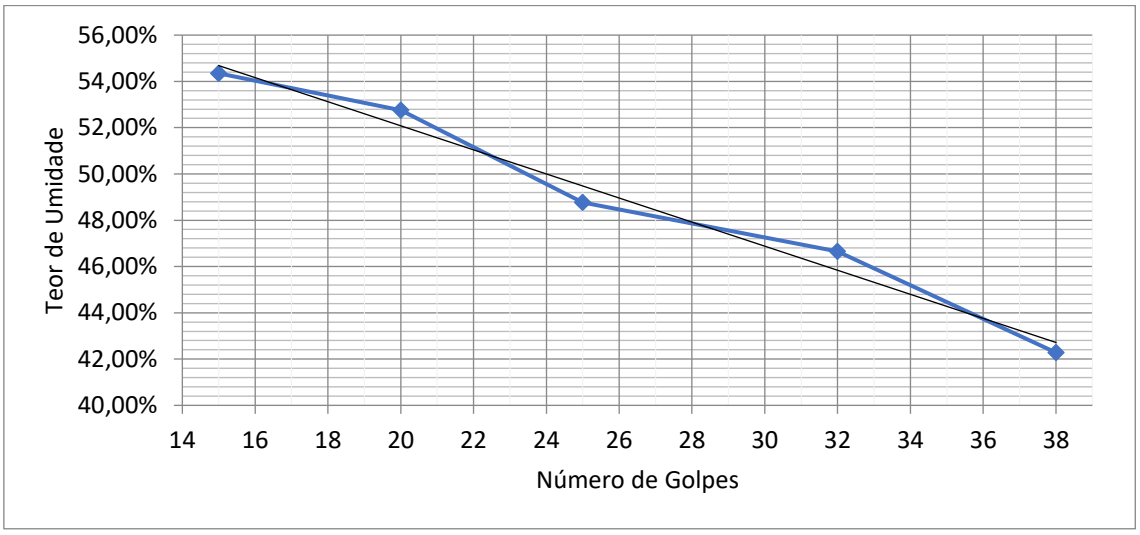
Já se tratando dos Limites de Atterberg, na Figura 14 estão apresentas fotos da execução dos ensaios de Limite de Plasticidade e de Liquidez. Na Figura 15 está apresentada o resultado destes ensaios.

Figura 13: Execução dos ensaios de Limites de Atterberg

Figura a: Ensaio de limite de liquidez; Figura b: Ensaio de limite de plasticidade

Fonte: Arquivo pessoal

Figura 145: Curva obtida no ensaio de limite de liquidez



Fonte: Arquivo pessoal

Com a interpolação dos dados, é possível obter o valor do Limite de Liquidez através do gráfico, que se deu próximo a 49%. Já para o Limite de Plasticidade, com a umidade obtida após a realização da amostra, foi possível calcular seu valor, que se deu próximo a 44%. Sendo assim, como o Índice de Plasticidade é obtido através da subtração do valor de Limite de Liquidez pelo de Plasticidade, o material pode ser caracterizado com baixa plasticidade.

Já na Tabela 2 está apresentado o resultado da Fluorescência de Raios X, onde é possível observar que o rejeito possui uma alta concentração de óxidos de ferro, silício, titânio e cálcio, o que influencia diretamente nas reações de cimentação quando adicionado cimento em um possível traço para a fabricação de tijolos de solo-cimento.

Tabela 02: Composição mineralógica rejeito fino

COMPOSIÇÃO REJEITO FINO	
ELEMENTO	**QUANTIDADE (%)**
Óxido de Ferro (III) - Fe_2O_3	41,046
Dióxido de Silício - SiO2	22,656
Dióxido de Titânio - TiO_2	11,574
Óxido de Cálcio - CaO	8,941
Pentóxido de Fósforo - P_2O_5	4,579
Óxido de Alumínio - Al_2O_3	4,340
Óxido de Potássio - K_2O	2,088
Óxido de Magnésio - MgO	1,951
Dióxido de Zircônia - ZrO_2	0,898
Óxido de Manganês - MnO	0,755
Óxido de Cério (IV) - CeO_2	0,469
Óxido de Estrôncio - SrO	0,355
Monóxido de Nióbio - NbO	0,231
Óxido de Cobre (II) - CuO	0,066
Óxido de Ítrio(III) - Y_2O_3	0,053

Fonte: Arquivo pessoal

Na Tabela 03 estão apresentados uma síntese dos dados da caracterização geotécnica do rejeito estudado.

Tabela 03: Caracterização do rejeito fino

Solo	**Fração Granulométrica (%)**					**Limites de Atterberg (%)**			**γ_s (g/cm³)**	**γ_d máximo (g/cm³)**	**Teor de umidade ótima (%)**
	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Silte	Argila	LL	LP	IP			
ML	0	0,92	6,13	33,14	59,81	49	44	6	2,479	1,64	28,3

Fonte: Arquivo pessoal

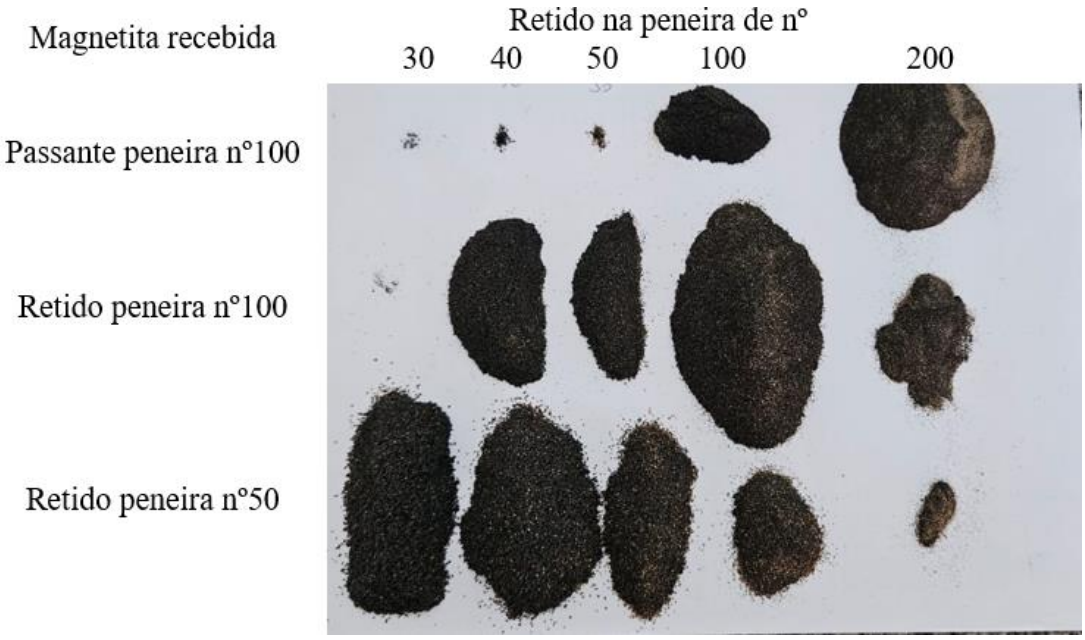
3.1.2.2 Rejeito de magnetita proveniente do beneficiamento da apatita

Para a caracterização desse material primário, que foi fornecido em três granulometrias diferentes (retidos na peneira de malha nº 50, retidos na peneira de malha nº100 e passantes na peneira de malha nº100), foram realizados, para cada uma delas, os

ensaios de análise granulométrica por peneiramento, de acordo com a norma ABNT NBR 7181 (2016): Solo – Análise Granulométrica; limites de plasticidade e de liquidez, de acordo com as normas ABNT NBR 7180 (2016): Solo – Determinação do limite de Plasticidade e ABNT NBR 6459 (2016): Solo – Determinação do limite de Liquidez e determinação da massa específica, de acordo com a norma ABNT NBR 6508: Grãos de solos que passam na peneira de 4,8mm – Determinação da massa específica, que visa determinar a massa específica das partículas sólidas do solo .

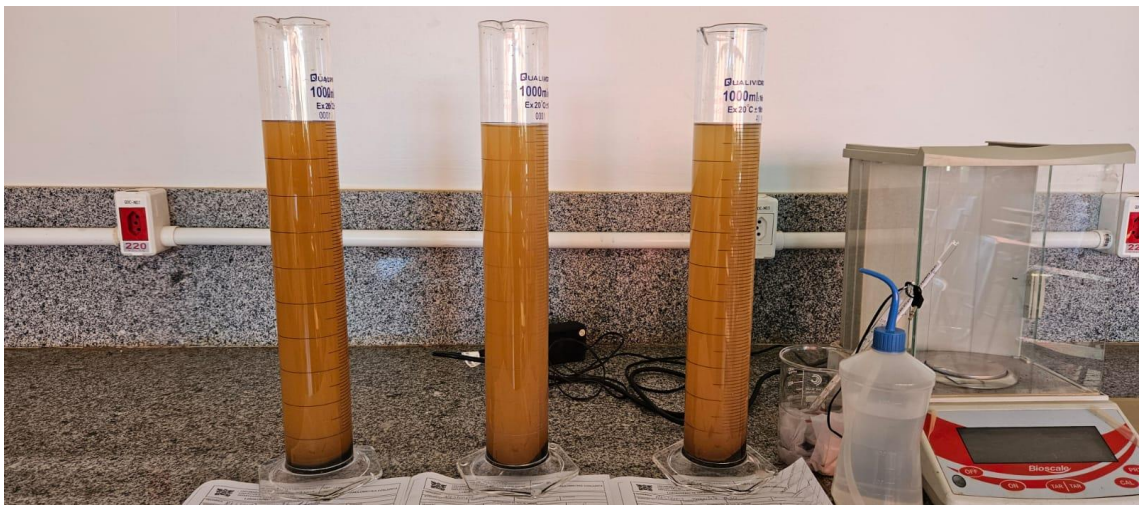
Nas Figuras 16 e 17 estão apresentadas fotos da execução do ensaio de granulometria, onde é possível visualizar a quantidade de material retido de acordo com a malha de cada peneira dos três materiais fornecidos e também durante a execução do ensaio onde os mesmos estavam misturados com água e defloculante, para aferição de sua densidade.

Figura 15: Granulometria material obtida após peneiramento



Fonte: Arquivo pessoal

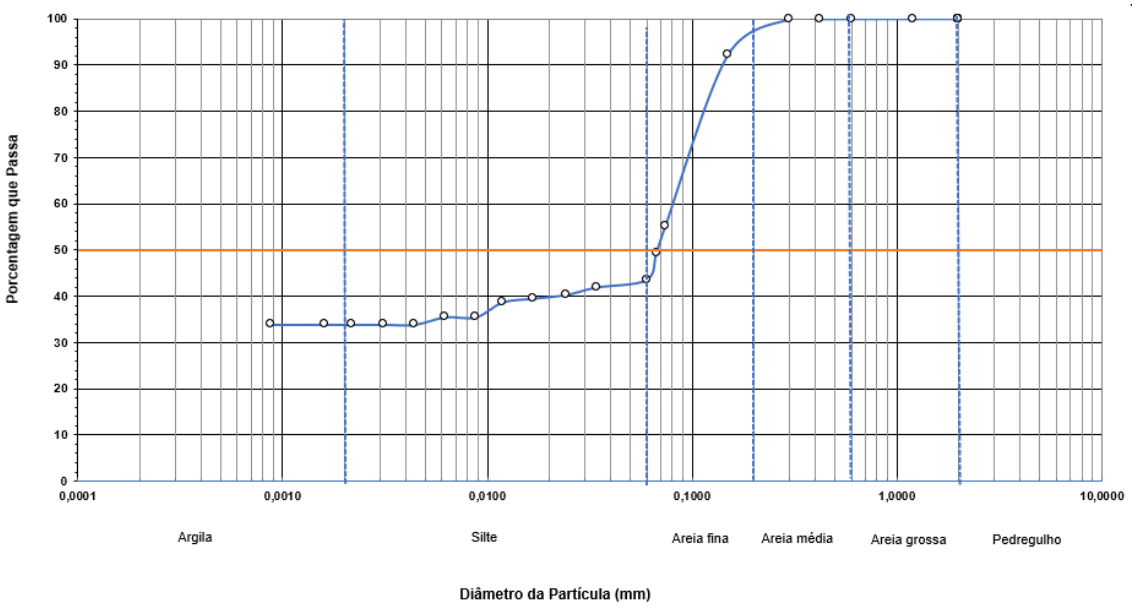
Figura 16: Amostras decantando para medição da densidade



Fonte: Arquivo pessoal

Na Figura 18 está apresentada a curva granulométrica do material primário passante na peneira de Nº100

Figura 17: Curva granulométrica do material primário recebido passante na peneira de Nº100



Fonte: Arquivo Pessoal

Este material é classificado de acordo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) como SC (Areia Argilosa).

Na Tabela 04 estão apresentados uma síntese dos dados da caracterização geotécnica do rejeito estudado.

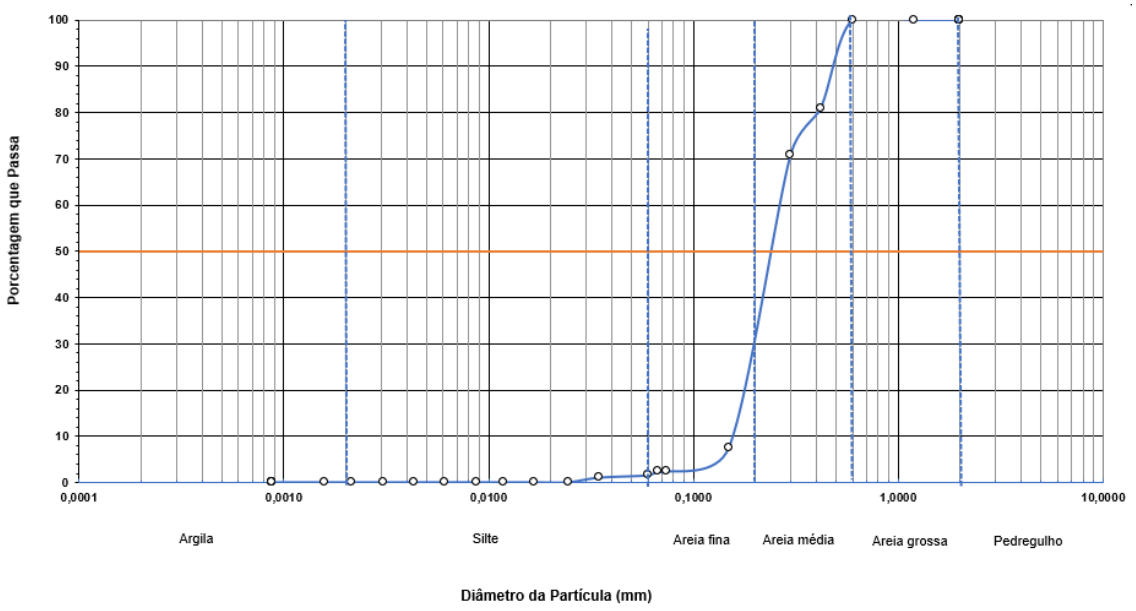
Tabela 04: Caracterização do rejeito primário passante na peneira de nº100

Solo	**Fração Granulométrica (%)**					**Limites de Atterberg (%)**			**γ_s (g/cm³)**
	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Silte	Argila	LL	LP	IP	
SC	0	3	53,46	9,68	33,86	NP	NP	NP	4,429

Fonte: Arquivo Pessoal

Na Figura 19 está apresentada a curva granulométrica do material primário retido na peneira de Nº100

Figura 18: Curva granulométrica do material primário recebido retido na peneira de Nº100



Fonte: Arquivo Pessoal

Este material é classificado de acordo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) como SP (Areias mal graduadas).

Na Tabela 05 estão apresentados uma síntese dos dados da caracterização geotécnica do rejeito estudado.

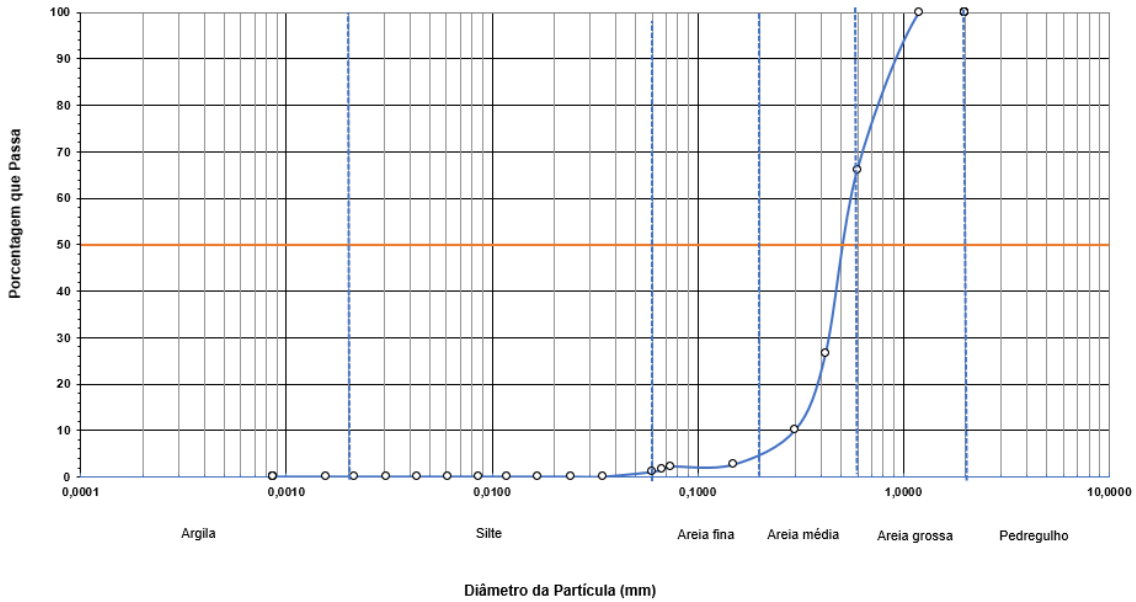
Tabela 05: Caracterização do rejeito primário retido na peneira de Nº100

Solo	Fração Granulométrica (%)					Limites de Atterberg (%)			γ_s (g/cm³)
	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Silte	Argila	LL	LP	IP	
SP	0,01	69,99	28,5	1,5	0	NP	NP	NP	4,578

Fonte: Arquivo Pessoal

Na Figura 20 está apresentada a curva granulométrica do material primário retido na peneira de Nº50.

Figura 190: Curva granulométrica do material primário recebido retido na peneira de Nº50



Fonte: Arquivo Pessoal

Este material é classificado de acordo Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) como SP (Areias mal graduadas).

Na Tabela 06 estão apresentados uma síntese dos dados da caracterização geotécnica do rejeito estudado.

Tabela 06: Caracterização do rejeito primário retido na peneira de Nº50

Solo	Fração Granulométrica (%)					Limites de Atterberg (%)			γ_s (g/cm³)
	Areia grossa	Areia média	Areia fina	Silte	Argila	LL	LP	IP	
SP	33,87	61,13	4	1	0	NP	NP	NP	4,587

Fonte: Arquivo Pessoal

Já se tratando dos Limites de Atterberg, devido as características do material, os mesmos foram classificados como NP- Não Plásticos.

Já para a mistura das três granulometrias, de forma igualitária, foi realizado a análise química através da espectrometria por fluorescência de raios X, de acordo com a norma ABNT NBR 16137/2016: Ensaios não destrutivos – Identificação de materiais por teste por pontos, espectrometria por fluorescência de raios X e espectrometria por emissão óptica.

Na Tabela 07 está apresentado o resultado da Fluorescência de Raios X, onde é possível observar que o rejeito possui uma alta concentração de óxidos de ferro, titânio, silício, fósforo e cálcio, o que influencia diretamente no peso específico dos sólidos do material e nas reações de cimentação quando adicionado cimento em uma possível mistura.

Tabela 07: Composição mineralógica rejeito magnetitas

COMPOSIÇÃO REJEITO MAGNETITAS	
ELEMENTO	**QUANTIDADE (%)**
Óxido de Ferro (III) - Fe_2O_3	67,995
Dióxido de Titânio - TiO_2	8,540
Dióxido de Silício - SiO2	6,210
Pentóxido de Fósforo - P_2O_5	6,047
Óxido de Cálcio - CaO	5,503
Óxido de Bário - BaO	2,471
Óxido de Alumínio - Al_2O_3	1,089
Óxido de Manganês - MnO	1,030
Dióxido de Zircônia - ZrO_2	0,320
Óxido de Cromo (III) - Cr_2O_3	0,280
Monóxido de Nióbio - NbO	0,228
Óxido de Estrôncio - SrO	0,224
Óxido de Cobre (II) - CuO	0,063

Fonte: Arquivo Pessoal

3.2. Fabricação do tijolo solo-cimento

Para a fabricação dos tijolos de solo-cimento, de acordo com a norma ABNT NBR 10833 (2012): Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - procedimento, foi estudado a preparação de dois traços com diferentes dosagens de rejeito e com a porcentagem fixa de cimento, buscando uma combinação que atenda todos os parâmetros exigidos nesse tipo de produto.

Após a definição de possíveis traços que poderiam atender o objetivo do trabalho, para cada um deles, de acordo com a mesma norma, devem-se moldar no mínimo 20 tijolos ou blocos na própria prensa e curá-los. Esta mistura de solo-cimento deve ser manual ou mecânica, adicionando cimento ao solo, já destorroado e peneirado, misturando os materiais até obter uma coloração uniforme, sendo posteriormente colocado água gradativamente, misturando os materiais, até atingir a umidade ideal para a realização do trabalho.

Após esta etapa, se orientando com base na norma ABNT NBR 10833 (2012): Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica - procedimento, deve-se transferir, imediatamente, a mistura para o molde e executar a prensagem. Em seguida, durante os sete primeiros dias de idade dos tijolos, deve-se manter os elementos úmido, a fim de garantir a cura necessária. Os tijolos só devem ser utilizados para sua função pré-determinada após 14 dias de idade de sua fabricação. Após este procedimento, retirar aleatoriamente 10 unidades para a realização de ensaios para a determinação de seus parâmetros físicos e químicos.

3.3. Determinação dos traços dos tijolos

Com os resultados obtidos através dos ensaios de caracterização de cada material, foi optado por realizar um traço de tijolos somente com rejeito de magnetita, com suas diferentes granulometrias e outro traço com a primeira mistura obtida em adição ao rejeito fino. Ainda, lembrando que segundo a ABNT NBR 10833 (2012): Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – procedimento, o solo recomendado para a fabricação do tijolo de solo-cimento são os que possuem as características descritas a seguir:

Passando na peneira ABNT 4,75mm (Nº4) ---------- 100%

Passando na peneira ABNT 0,075mm (Nº200) ---------- 10 a 50%

Limite de Liquidez ---------- ≤ 45%

Índice de Plasticidade ---------- ≤ 18%

Já segundo o fabricante de prensas para a fabricação de tijolos de solo-cimento Sahara, a mistura ideal deve ser composta por um solo arenoso contendo entre 70% a 80% de areia, adicionado a um outro material com cerca de 20 a 30% de solo argiloso, e 12 a 15% de cimento.

Sendo assim, os traços foram definidos de forma que atendessem tanto a norma ABNT NBR 10833 (2012): Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – procedimento quanto ao manual do fabricante da prensa comercial.

Ainda, como o foco do trabalho era analisar a adição dos diferentes rejeitos na formulação dos tijolos de solo-cimento, foi fixado, para ambos os traços, uma porcentagem de cimento adicionado de 12%.

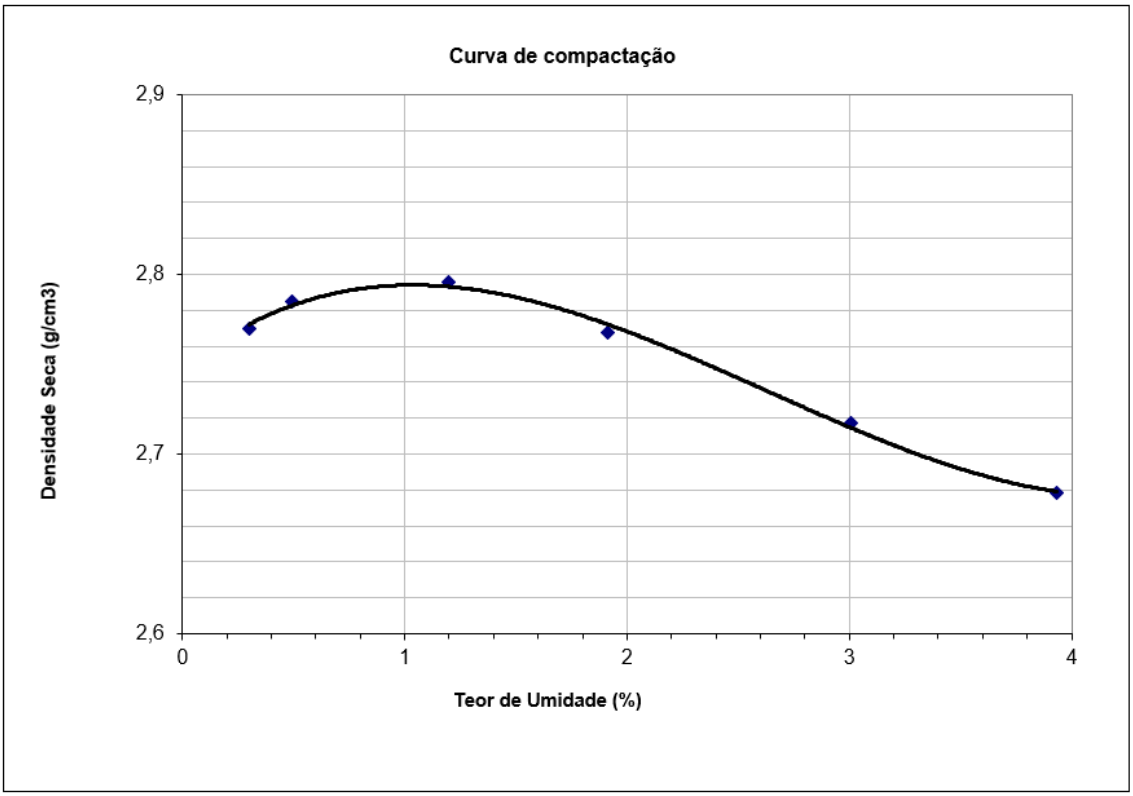
3.3.1 Traço obtido através das três granulometrias de rejeito de magnetita

Para atender tanto a recomendação da norma ABNT NBR 10833 (2012): Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – procedimento como o manual do fabricante das prensas de tijolos de solo-cimento, foi determinado um traço constituído por 45% do material primário passante na peneira nº100, 25% do material primário retido na peneira nº100 e 30% do material primário retido na peneira nº50, resultando em uma mistura com 26,002% de materiais passantes na peneira 0,075mm (nº200), 100% de materiais passantes na peneira de malha 4,75mm (nº4) e LL≤45% e LP≤18% por ser um material não plástico, se enquadrando nos critérios mencionados. Ainda, de acordo com o manual do fabricante de prensas, essa mistura acarreta em 20,27% de materiais passantes na peneira 0,06 (nº230), também se enquadrando na porcentagem de 20 a 30% de materiais finos na amostra.

Sendo assim, definido o primeiro traço, foi realizado os ensaios de Limites de Atterberg de acordo com as normas ABNT NBR 7180 (2016): Solo – Determinação do limite de Plasticidade e ABNT NBR 6459 (2016): Solo – Determinação do limite de Liquidez e ensaio de compactação MINI MCV, de acordo com a norma DNER-ME 258/94: Solos compactados em equipamento miniatura - Mini- MCV – Método de ensaio da mistura obtida, para definir a umidade ótima de compactação, assim como o peso de cada amostra a ser colocada no molde. Esse último ensaio foi escolhido como substitutivo

ao ensaio de compactação por proctor normal devido a pouca quantidade de material disponível. Na Figura 21 é possível observar a curva de compactação obtida

Figura 20: Curva de compactação por proctor normal da mistura de magnetitas



Fonte: Arquivo Pessoal

De acordo com o gráfico, é possível observar que a umidade ótima de compactação gira em torno de 1% e o o peso específico seco máximo obtido foi de 2,79 g/cm³. Isso significa, que nesse método, com a umidade próxima ao sinalado, conseguimos compactar o solo de forma que fique 2,79 gramas de material seco por cm³ de volume de molde. Ainda, a mistura foi classificada como NP – Não Plástica.

3.3.2 Traço obtido através da mistura de magnetitas com adição de rejeito fino

Para atender tanto a recomendação da norma ABNT NBR 10833 (2012): Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica – procedimento como o manual do fabricante das prensas de tijolos de solo-cimento, foi aproveitado o traço anterior, com a mistura das três granulometrias, e foi adicionado 13% do rejeito fino primário. Com esse novo traço, o resultado obtido foi de

uma mistura com 35,23% de materiais passantes na peneira 0,075mm (nº200), 100% de materiais passantes na peneira de malha 4,75mm (nº4) e LL≤45% e LP≤18% por ser um material de leve plasticidade, se enquadrando nos critérios mencionados. Ainda, de acordo com o manual do fabricante de prensas, essa mistura acarreta em 29,72% de materiais passantes na peneira 0,06 (nº230), também se enquadrando na porcentagem de 20 a 30% de materiais finos na amostra.

Sendo assim, definido o segundo traço, foi realizado os ensaios de Limites de Atterberg de acordo com as normas ABNT NBR 7180 (2016): Solo – Determinação do limite de Plasticidade e ABNT NBR 6459 (2016): Solo – Determinação do limite de Liquidez e ensaio de compactação MINI MCV, de acordo com a norma DNER-ME 258/94: Solos compactados em equipamento miniatura - Mini- MCV – Método de ensaio da mistura, para definir a umidade ótima de compactação, assim como o peso de cada amostra a ser colocada no molde. Esse último ensaio foi escolhido como substitutivo ao ensaio de compactação por proctor normal devido a pouca quantidade de material disponível.

Na Figura 22 é possível observar os corpos de prova obtidos com a realização do ensaio de Mini MCV

Figura 212: Corpos de prova obtidos após realização de ensaio Mini MCV

Fonte: Arquivo pessoal

Na Figura 23 é possível observar a realização dos ensaios de Limites de Atterberg

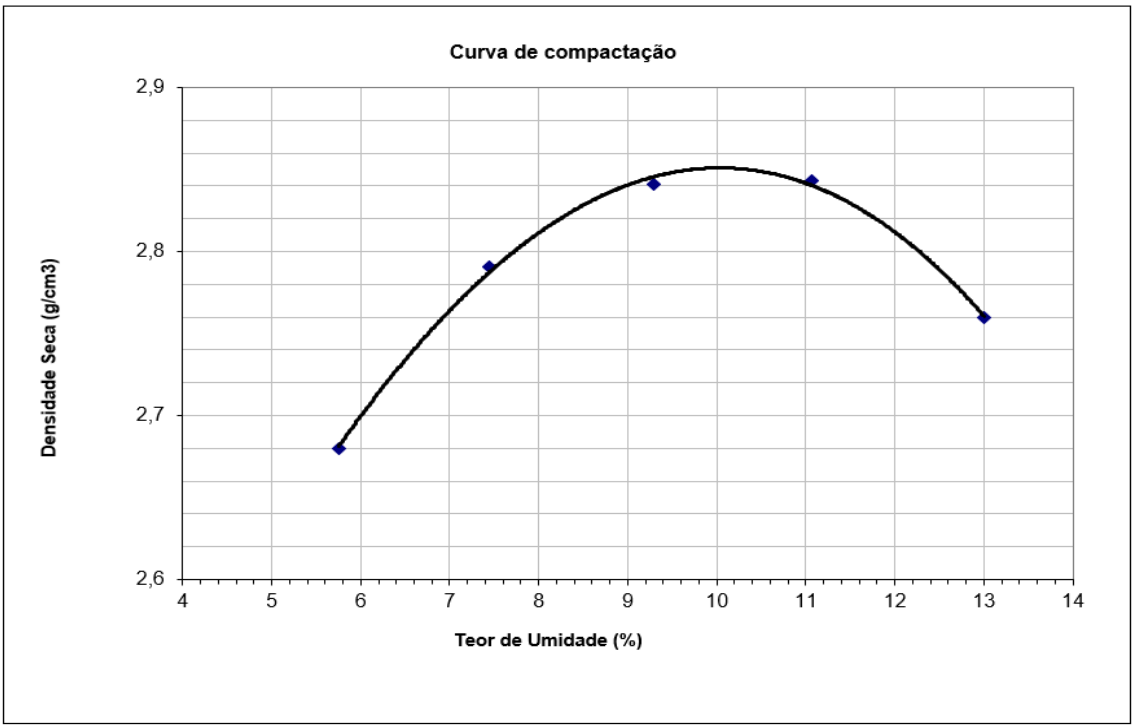
Figura 223: Execução dos ensaios de Limites de Atterberg

Figura a: Ensaio de limite de liquidez; Figura b: Ensaio de limite de plasticidade

Fonte: Arquivo pessoal

Na Figura 24 é possível observar a curva de compactação obtida da mistura

Figura 234: Curva de compactação obtida através de ensaio Mini MCV



Fonte: Arquivo pessoal

De acordo com o gráfico, é possível observar que a umidade ótima de compactação gira em torno de 10% e o peso específico seco máximo obtido foi de 2,85 g/cm³. Isso significa, que nesse método, com a umidade próxima ao sinalado,

conseguimos compactar o solo de forma que fique 2,85 gramas de material seco por cm³ de volume de molde. Ainda, a mistura foi classificada como IP=3, ou seja, de leve plasticidade.

3.3.3 Composição final dos 2 traços obtidos

Na Tabela 08 pode-se visualizar uma síntese da composição final, em porcentagem, dos 2 traços obtidos, já com a adição de cimento e de água de acordo com a umidade ótima de cada mistura.

Tabela 08: Composição dos materiais dos 2 traços determinados

Composição Materiais	**Traço 01 – 3 granulometrias de rejeito de magnetita**	**Traço 02 – mistura de magnetitas com adição de rejeito fino**
Material primário passante na peneira nº100 (%)	39,20	31,01
Material primário retido na peneira nº100 (%)	21,78	17,23
Material primário retido na peneira nº50 (%)	26,14	20,67
Rejeito fino (%)	0,00	10,30
Cimento CPII (%)	11,88	10,80
Água (%)	1,00	10,00

Fonte: Arquivo pessoal

3.4. Moldagem dos tijolos de solo-cimento

Devido a pouca quantidade de rejeitos fornecidos pela mineradora, restando menos de 8,5kg do rejeito fino após o mesmo ser seco em estufa, nosso trabalho teve que ser adaptado de forma que, o consumo deste material, para a realização da pesquisa, fosse minimizado. Sendo assim, foi improvisado um molde menor, com dimensões proporcionais as prensas usuais, para a fabricação dos tijolos de solo-cimento maciços, com o intuito de reduzir o consumo de material por tijolo fabricado, mantendo o mesmo quantitativo de elementos fabricados previstos.

Na Figura 25 é possível visualizar o molde utilizado. Já na Tabela 09, consta as dimensões internais do mesmo.

Figura 24: Molde utilizado para a fabricação dos tijolos de solo cimento

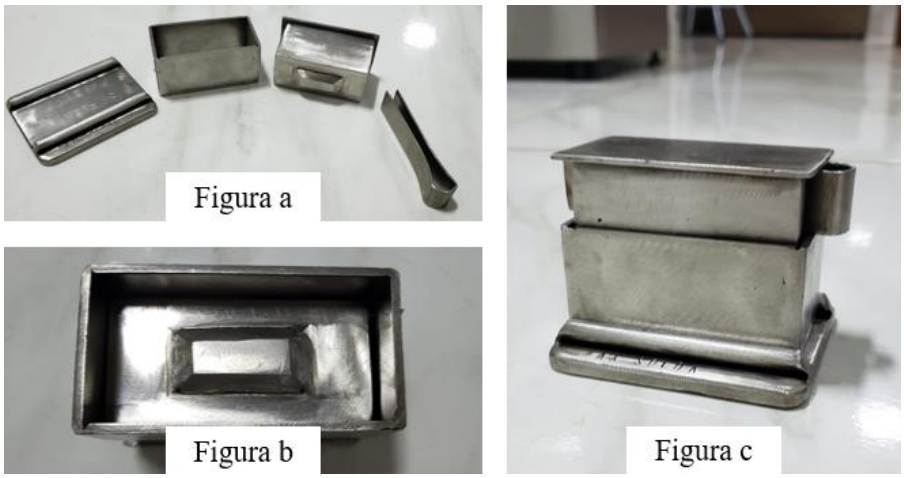


Figura a: Peças equipamento; Figura b: Vista lateral; Figura c: Vista transversal

Fonte: Arquivo pessoal

Tabela 09: Dimensões internas do molde de tijolo adaptado

Tipos	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Altura (mm)
C	80	40	20

Fonte: Arquivo pessoal

Ainda, para compactar de forma estática o material que seria colocado dentro do molde de forma homogênea e eficaz, foi utilizada uma prensa CBR (Prensa de ensaio de Índice de Suporte Califórnia), demonstrada na Figura 26.

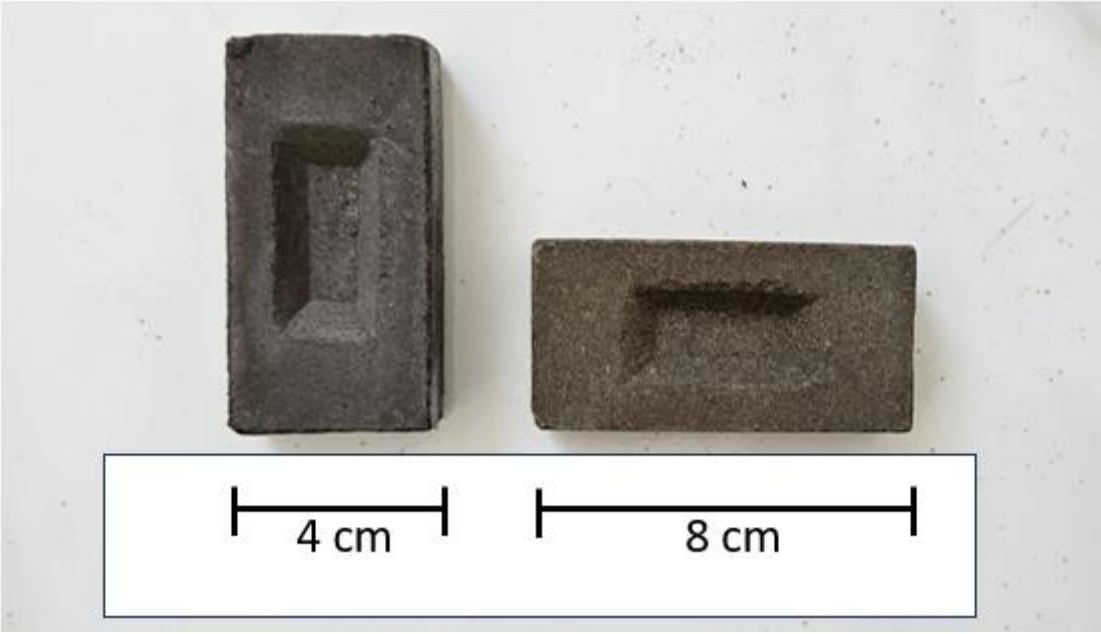
Figura 25: Prensa CBR atuando sobre o molde7

Fonte: Arquivo pessoal

Com isso, munidos de informações como umidade ótima de compactação e peso de solo a ser colocado na volumetria do molde para obtenção de um ɣd máximo, foram produzidos 20 tijolos de cada traço, sendo o primeiro somente com diferentes granulometrias de magnetita e outro com adição de 13% sobre a primeira mistura de rejeito fino de fosfato. Em ambos os casos, foi fixado uma porcentagem de 12% em adição de cimento.

Na Figura 27 pode-se visualizar dois tijolos, cada um realizado com um dos traços definidos de material.

Figura 26: Tijolos realizados através do molde adaptado



Fonte: Arquivo pessoal

Após a fabricação dos tijolos, os mesmos foram mantidos em câmara úmida por 14 dias para sua cura adequada, onde os mesmos eram molhados regularmente.

3.5 Ensaios para determinação de parâmetros dos tijolos solo-cimento

Após a fabricação e cura dos tijolos de solo-cimento foram realizados ensaios nos diferentes moldes obtidos para determinação de parâmetros como resistência à compressão simples e absorção de água, de acordo com a norma ABNT NBR 8492 (2012): Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio, que estabelece o método para

análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água em tijolos de solo-cimento para alvenaria sem função estrutural. Para o primeiro ensaio, sete tijolos por traço foram cortados ao meio, perpendicularmente à sua maior dimensão, com a ajuda de uma serra circular utilizada em marmorarias e, posteriormente, as faces maiores das duas metades obtidas foram superpostas com as superfícies cortadas invertidas, ligando-as com uma camada fina e enchendo as reentrâncias de pasta de cimento Portland, formando corpos de prova de 40mm x 40mm x 40mm. Após aguardar a cura dessa pasta, foi realizada a ruptura dos corpos de prova na prensa universal para obtenção da resistência à compressão de cada tijolo. No caso do segundo ensaio, de absorção de água, três tijolos inteiros por traço realizado foram secos em estufas e posteriormente pesados. Após essa etapa, as amostras ficaram imersas por 24 horas em água, secos superficialmente e pesados novamente. Com esses dados é possível calcular a absorção de água por cada tijolo.

Nas Figuras 28 e 29 é possível visualizar as amostras antes, durante e após a solicitação de compressão.

Figura 27: Amostras preparadas para ruptura

Fonte: Arquivo pessoal

Figura 28: Ruptura dos corpos de prova através de prensa universal

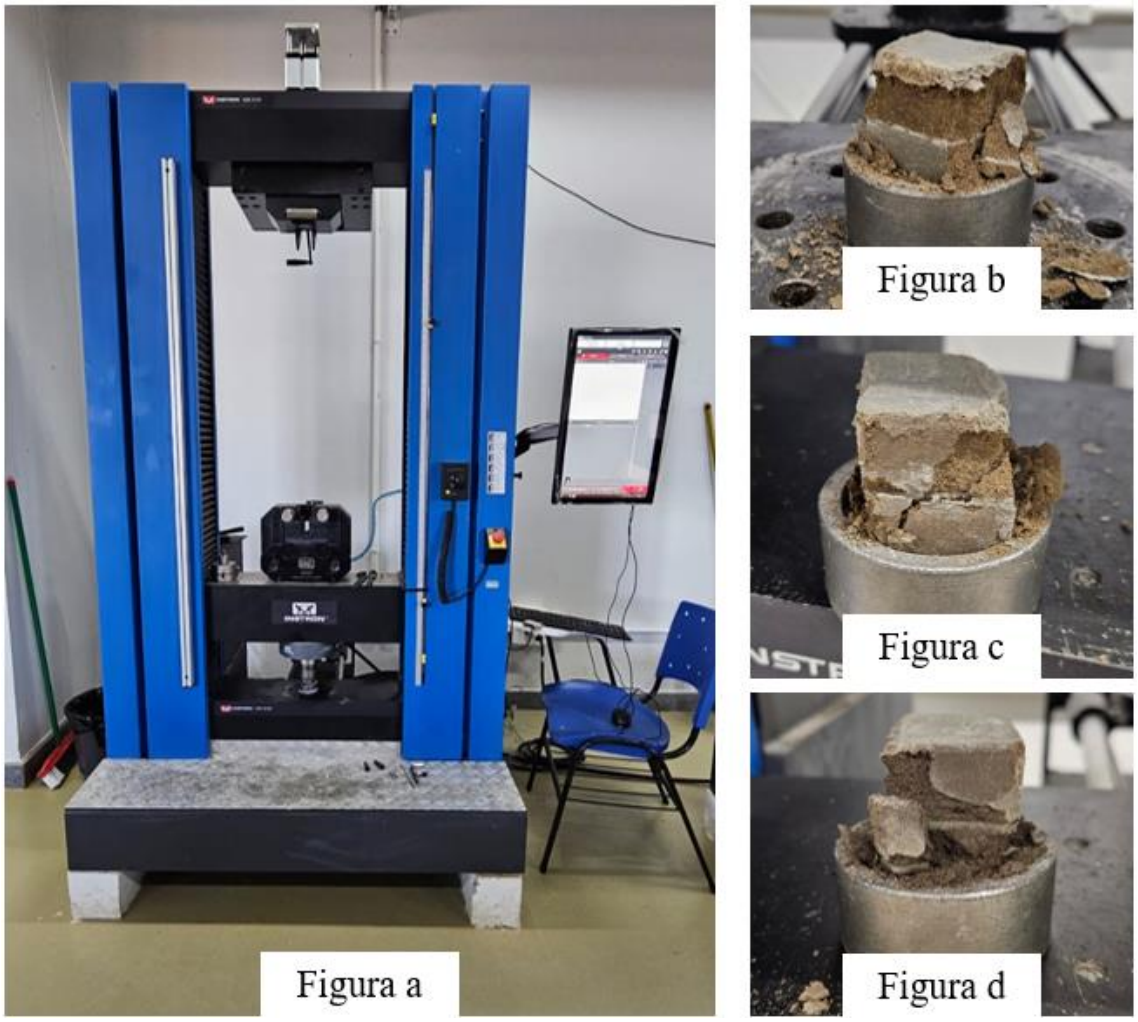


Figura a: Prensa universal rompendo a amostra; Figuras b, c e d: Corpos de prova após ruptura

Fonte: Arquivo pessoal

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Lote produzido com o traço obtido através das três granulometrias de rejeito de magnetita

No ANEXO A pode-se observar os resultados obtidos através da ruptura dos corpos de prova na prensa universal. Na Tabela 10, é possível visualizar a síntese desses valores

Tabela 10: Resultados ensaios de resistência à compressão tijolos

Tijolos lote mistura magnetitas			
Corpo de prova	**Resistência máxima à compressão (KN)**	**Área solicitada (cm²)**	**MPa**
1	9,03	14,43	6,26
2	6,76	14,50	4,66
3	6,91	14,89	4,64
4	9,48	14,60	6,49
5	9,00	14,69	6,13
6	7,35	14,57	5,04
7	7,23	14,47	5,00

Fonte: Arquivo pessoal

Munidos desses dados, é possível observar que o valor máximo de resistência obtido foi de 6,49 Mpa, o mínimo de 4,66 Mpa, e a média de 5,46 MPa, muito acima do mínimo exigido de 2 MPa. Já considerando os valores de forma unitária, nenhuma amostra obteve valor inferior a 1,7 MPa. Ainda, para esses dados, foi calculado um desvio padrão de 0,74, ou seja, as amostras variam 0,74 MPa da média dos valores obtidos.

Já no ensaio de absorção de água, a normativa pede um limite máximo individual de 22% e média do lote de 20%, ambos com idade mínima de 7 dias. De acordo com os resultados, ambas condições foram obtidas, obtendo o valor máximo de absorção de 8,75%, mínimo de 8,32%, média de 8,50% e com um desvio padrão dos dados de 0,17, valor de variação muito baixo, o que significa que as amostras estão bem homogêneas. Essas informações podem ser observadas na Tabela 11.

Tabela 11: Resultados ensaios de absorção de água

Tijolos lote mistura magnetitas			
Corpo de prova	**Massa seca (g)**	**Massa saturada (g)**	**Absorção (%)**
1	173,24	188,39	8,75
2	171,78	186,08	8,32
3	170,75	185,17	8,45

Fonte: Arquivo pessoal

4.2. Lote prozido com o traço obtido através da mistura de magnetitas com adição de rejeito fino

No ANEXO A é possível observar os resultados obtidos através da ruptura dos corpos de prova na prensa universal. Na Tabela 12, é possível visualizar a síntese desses valores.

Tabela 12: Resultados ensaios de resistência à compressão tijolos

Tijolos mistura magnetitas e rejeito fino			
Corpo de prova	**Resistência máxima à compressão (KN)**	**Área solicitada (cm²)**	**MPa**
1	9,66	14,7	6,56
2	7,98	14,6	5,48
3	7,56	15,1	4,99
4	8,3	14,5	5,72
5	9,68	15,0	6,47
6	7,45	14,8	5,03
7	7,45	14,7	5,08

Fonte: Arquivo pessoal

Munidos desses dados, é possível observar que o valor máximo de resistência obtido foi de 6,56 MPa, o mínimo de 4,99 MPa, e a média de 5,62 MPa, muito acima do mínimo exigido de 2 MPa. Já considerando os valores de forma unitária, nenhuma amostra obteve valor inferior a 1,7 MPa. Ainda, para esses dados, foi calculado um desvio padrão de 0,61, ou seja, as amostras variam 0,61 MPa da média dos valores obtidos.

Já no ensaio de absorção de água, a normativa pede um limite máximo individual de 22% e média do lote de 20%, ambos com idade mínima de 7 dias. De acordo com os resultados, ambas condições foram obtidas, obtendo o valor máximo de absorção de 9,84%, mínimo de 9,55%, média de 9,71% e com um desvio padrão dos dados de 0,12, valor de variação muito baixo, o que significa que as amostras estão bem homogêneas. Essas informações podem ser observadas na Tabela 13.

Tabela 13: Resultados ensaios de absorção de água

Tijolo mistura magnetitas e rejeito fino			
Corpo de prova	**Massa seca (g)**	**Massa saturada (g)**	**Absorção (%)**
1	165,62	181,75	9,74
2	167,74	184,25	9,84
3	166,15	182,02	9,55

Fonte: Arquivo pessoal

5. CONCLUSÃO

Conforme o que foi apresentado nesse trabalho, que teve como objetivo verificar a possibilidade de fabricação de tijolos maciços, compostos com cimento Portland e com rejeitos provenientes da mineração, com propriedades físicas e mecânicas compatíveis com as características dos tijolos fornecidos comumente no mercado e com as exigências das normas ABNT NBR 8491 (2012): Tijolo de solo cimento – requisitos e ABNT NBR 8492 (2012): Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio, foi possível visualizar que os rejeitos provenientes do beneficiamento de apatita são materiais viáveis para a fabricação de tijolos de solo cimento.

Com os traços propostos, com substituição total do solo por rejeitos e adição de cimento, moldados com prensa CBR, umidade de moldagem e cura adequadas, verificamos ser possível fabricar tijolos competitivos com o mercado, dando um destino para esse material e agregando valor ao mesmo, já que eles são construídos com subproduto descartado pela mineradora.

Ainda, foi possível constatar que os valores de resistência à compressão dos tijolos produzidos, foram bem superiores ao exigido pelas normas citadas, com médias dos dois traços próximas a 6,5 MPa, assim como os valores de absorção bem inferiores ao máximo delimitado, com valores médios próximos a 9%, o que acarreta em um produto de excelente qualidade. E, quando comparado os dois traços trabalhados, é possível observar que, com a adição de 13% de rejeito fino, o tijolo obteve um leve acréscimo de resistência média à compressão, girando em torno de 2,9%, assim como melhor coesão do material, facilitando a moldagem e trabalhabilidade dos mesmos, sem aumentar muito a absorção de água do produto. Esses valores se devem principalmente a composição química do rejeito magnético, que garante um alto peso específico dos sólidos em seus materiais, favorecendo seus valores de resistência. Por outro lado, essa característica elevou a densidade final dos tijolos quando comparada com densidade dos tijolos maciços cerâmicos, o que acarreta em estruturas mais pesadas.

Entretanto, apesar da composição com o rejeito fino ser mais vantajosa, na prática esse material é de difícil processamento, uma vez que ele precisa passar por uma etapa de secagem e pode apresentar altos custos durante esse processo.

Outro ponto importante a ser lembrado é que durante o processamento do minério de fosfato, o rejeito magnético é fornecido em diferentes granulometrias, variando inclusive entre minas, podendo gerar a necessidade de um prévio peneiramento para prosseguir com a produção dos tijolos.

Visando uma maior validação do trabalho aqui descrito, é viável, para trabalhos futuros, a fabricação de tijolos de rejeito cimento em dimensões reais, de acordo com a norma ABNT NBR 8491 (2012): Tijolo de solo cimento – requisitos e com os mesmos traços aqui propostos. Ainda, além dos ensaios de resistência à compressão e ao ensaio de absorção de água realizados após a fabricação dos tijolos, ensaios de desempenho térmico trariam informações sobre a atuação dos mesmos quando solicitados a grandes variações de temperatura. Em adendo, estudos sobre possíveis reações dos tijolos com demais materiais da construção civil, poderiam nos trazer mais dados sobre as possíveis consequências que o uso desse material poderia acarretar em uma construção.

Outro ponto importante a ser avaliado é a durabilidade dos tijolos em ambientes úmidos e em ciclos de molhagem e secagem, já que os mesmos não passam por um processo de queima.

Além disso, pela sua composição mineralógica, estudos sobre a possibilidade de geração de contaminantes ao meio ambiente seriam importantes.

Pode-se também, devido a alta resistência obtida, estudar a viabilidade da fabricação dos tijolos de rejeito cimento, com os mesmos traços dos rejeitos, com uma porcentagem inferior de cimento, visando baratear os custos com esse material e sem deixá-los frágeis e abrasivos.

Outra idealização, seria a utilização do rejeito magnético proveniente do beneficiamento de apatita para a fabricação de blocos drenantes, já que eles apresentaram alta resistência e baixa absorção de água quando saturados, sendo essas características importantes para esses elementos. Nessa vertente, pode-se até estudar a viabilidade de

trabalhar com uma compactação menor das misturas, afim de ampliar ainda mais os espaços vazios e melhor na drenagem dos blocos.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, ANM, Brasília: Anuário Mineral Brasileiro - Principais Substâncias Metálicas,2019. Acesso em dezembro de 2021.

ARAUJO, M. M.S.; SANTOS, H. I. dos; FERREIRA, O. M. **Análise do gerenciamento dos resíduos sólidos da mineração Serra Grande S.A., Município de Crixás - Goiás**. 1989. 180 f.. Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Ambiental – Faculdade de Engenharia, Pontifica Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, Rio de Janeiro. **NBR 8491/2012: Tijolo de solo cimento – requisitos**. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, Rio de Janeiro. **NBR 8491/2012**: **Tijolo de solo-cimento – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio.** Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT, Rio de Janeiro. **NBR 10833/2012**: **Fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — procedimento**. Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO TIJOLO, ANITECO, 2021. Disponível em: https://www.aniteco.org.br/o-tijolo-ecologico/. Acesso em novembro de 2021.

BATES, Jeremy. **Barragens de rejeitos**. São Paulo: Signus, 2002.

BORGES, A. A. **Caracterização da parcela magnética de minério fosfático de carbonatito**. Ouro Preto, REM - Revista Escola de Minas, v. 61, n.1, p.29-34, 2008.

BRASIL. Lei nº 227, de 28 de fevereiro de 1967. Código de Mineração. Brasil. Diário Oficial da União - Seção 1 - 28/2/1967, Página 2417 .

DOMINGUES, R. M. V. **Avaliação do potencial económico de implementação da construção em BTC**. Braga: Universidade do Minho, 2015. 136p. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Civil).

ECOTERM, Tijolo ecológico, 2021. Disponível em: https://ecoterm.com.au/tijolo-ecologico. Acesso em novembro de 2021.

GOMES, A. C. F. **Aplicação de rejeito de mineração de ouro na produção de tijolo de solo-cimento.** 2021**.** Tese de doutorado, Curso de Engenharia Metalúrgica, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, 2021

GOMES, A. C. F.; ROCHA S.D.F.. **Amostragem de rejeito de garimpo de ouro no estado de mato grosso para uso em solo cimento.** 2019**.** In: XXVIII Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa Belo Horizonte-MG, 4 a 8 de Novembro de 2019. 1Programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, MG, 2019

MACHADO, M. S. M. M.. **Blocos para construção civil feitos com rejeitos depositados na Barragem de Candonga**. 2018. Dissertação (Mestrado em engenharia de materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018.

MENEZES, R. R. et al. **Reciclagem de resíduos da construção civil para a produção de argamassas**. Cerâmica 5S, [S. l.], p. 263-270, 2009.

MUSEU DE GEOLOGIA E CIÊNCIAS NATURAIS, Fosfatos, UNESP, 2021. Disponível em:https://www.assis.unesp.br/#!/departamentos/ciencias-biologicas/museu-cbi/acervo/minerais/fosfato/. Acesso em novembro de 2021.

NAÇÕES UNIDAS BRASIL, 2023. **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil.** Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em novembro de 2023

PEREIRA, Caio. **Tijolo ecológico: o que é tipos, vantagens e desvantagens**. Disponível em: https://www.escolaengenharia.com.br/tijolo-ecologico/. Acesso em: novembro 2023.

RUBIO, Jorge; OLIVEIRA, Cristiane; SILVA, Renato. **Aspectos ambientais nos setores mineiro e metalúrgico**. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Sílvia Cristina A. Tratamento de minérios. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

SAHARA TECNOLOGIA, 2021. Disponível em: https://www.jarfel.com.br/maquinas/tijolos-ecologicos-solo-cimento/prensa-manual-transformer.php. Acesso em novembro de 2021.

SAVI, A. F.; FILHO, E. V. G.; SAVI, E. M. S**. Engenharia apoiando o desenvolvimento sustentável**. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 13., Bauru, 2006. Anais… Bauru: SIMPEP, 2006. p. 1-7.

SEVERO, C. B. **Aproveitamento de rejeito de minério de ferro para fabricação de tijolos cerâmicos**. 2019. Trabalho de conclusão de curso – Curso de Engenharia de Minas, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Araxá, Mg, 2019.

SILVA, F. L. **Aproveitamento e reciclagem de resíduos de concentração de minério de ferro na produção de pavers e cerâmica**. 2014. Dissertação (Mestrado em engenharia de materiais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2014.

SILVA, L. C. S. et al. **Gestão de resíduos industriais: um estudo do aproveitamento de rejeitos na mineração**. SIMPROD, São Cristóvão/SE, IX. ed. p. 260-274, nov./dez. 2017. Anais do IX Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe (2017).

SOARES, Lindolfo. **Barragem de rejeitos**. In: LUZ, Adão Benvindo da; SAMPAIO, João Alves; FRANÇA, Sílvia Cristina A. Tratamento de minérios. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

VALE, Mineração, 2016. Disponível em: https://www.vale.com/pt/mineracao. Acesso em novembro de 2021.

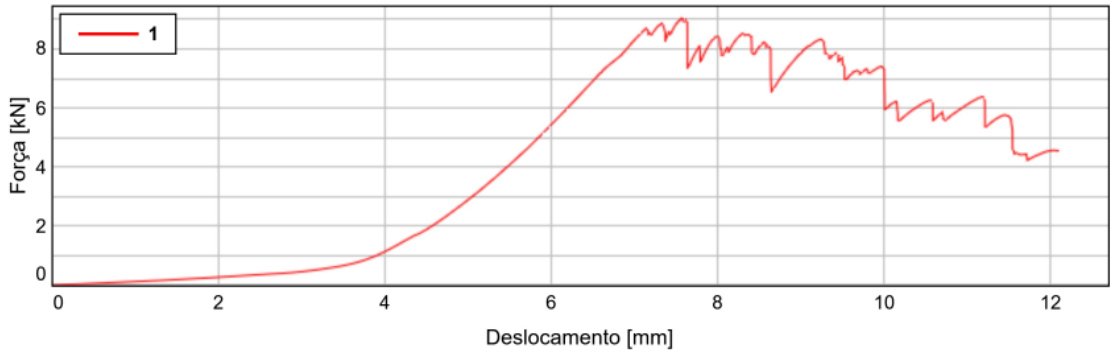
ZHANG, L. **Production of bricks from waste materials** – A review. Construction and Building Materials, 2013.

ANEXO A

1. Lote produzido com o traço obtido através das três granulometrias de rejeito de magnetita

Nas Figuras 30 a 36 é possível observar os resultados obtidos através da ruptura dos corpos de prova na prensa universal.

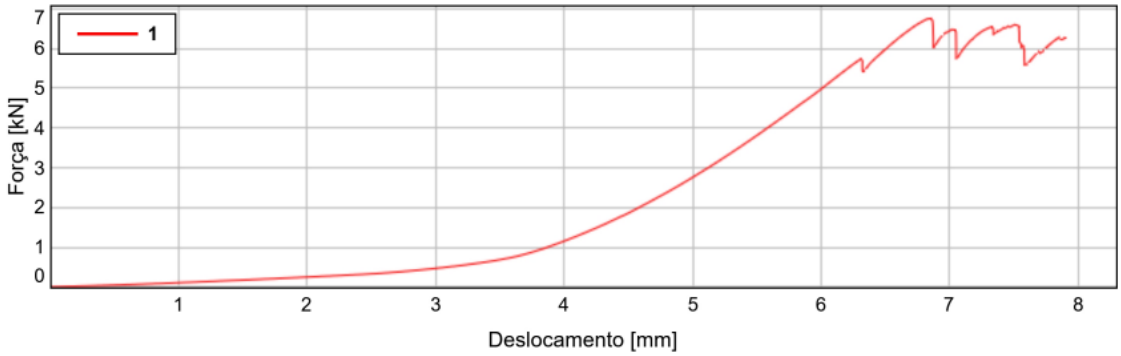
Figura 29: Resultado corpo de prova 1 de 7



	Máximo Força [kN]
1	9,03

Fonte: Arquivo pessoal

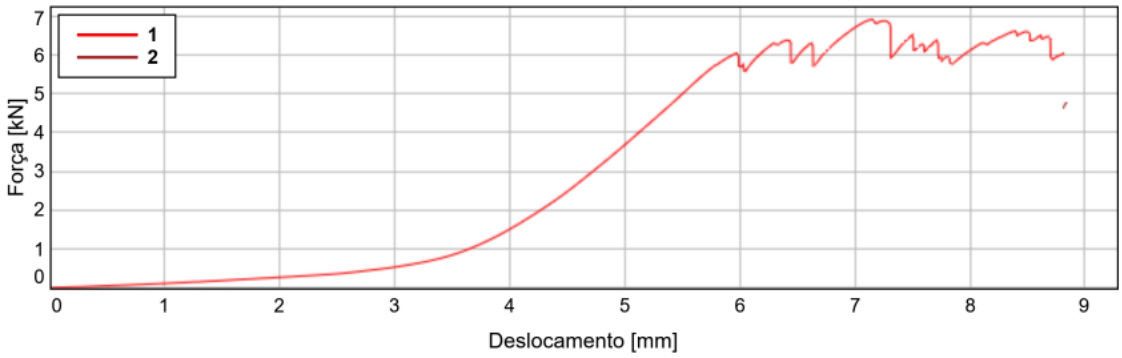
Figura 301: Resultado corpo de prova 2 de 7



	Máximo Força [kN]
1	6,76

Fonte: Arquivo pessoal

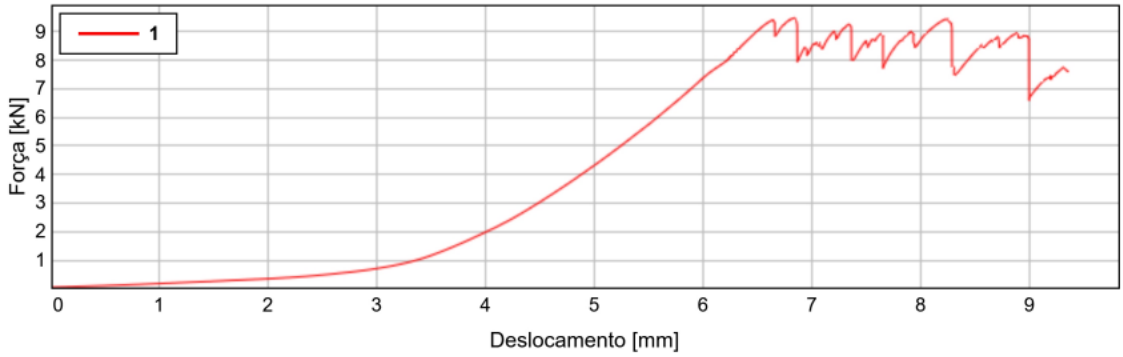
Figura 31: Resultado corpo de prova 3 de 7



	Máximo Força [kN]
1	6,91

Fonte: Arquivo pessoal

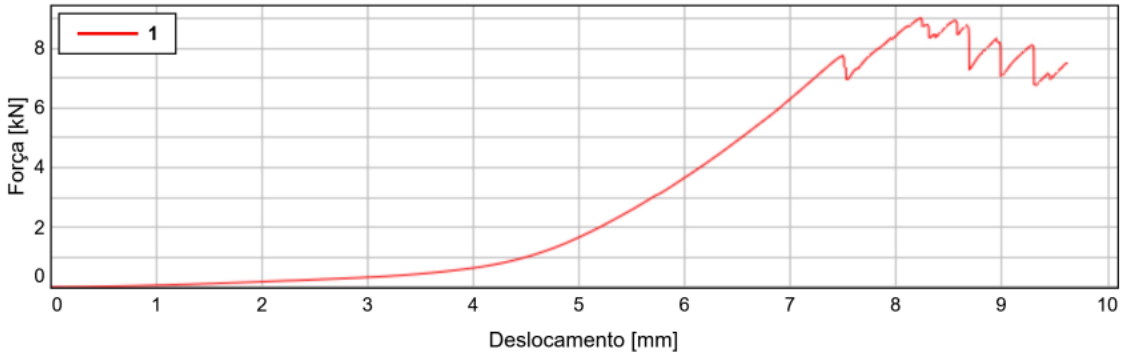
Figura 33: Resultado corpo de prova 4 de 7



	Máximo Força [kN]
1	9,48

Fonte: Arquivo pessoal

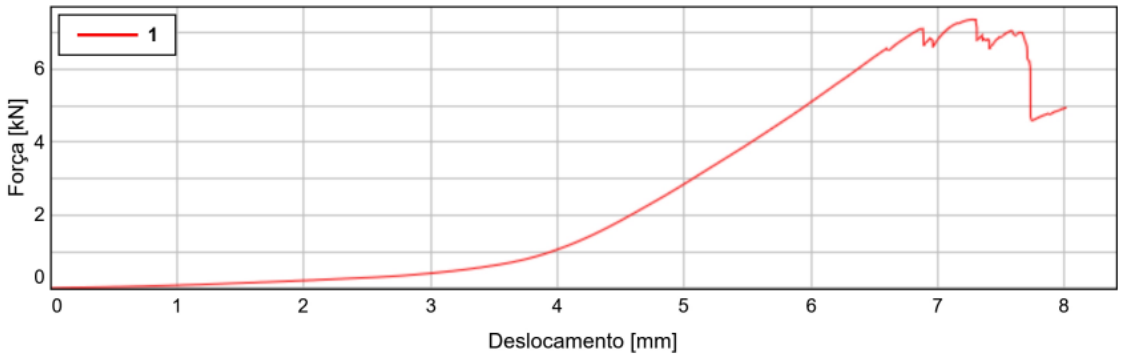
Figura 32: Resultado corpo de prova 5 de 7



	Máximo Força [kN]
1	9,00

Fonte: Arquivo pessoal

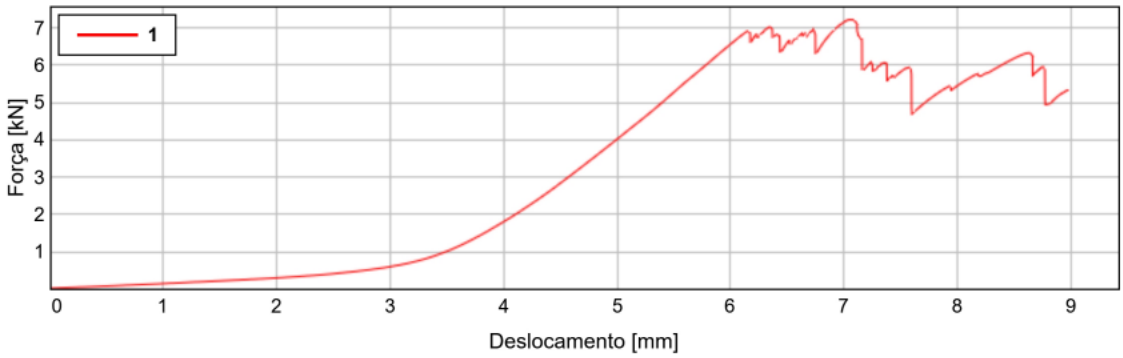
Figura 35: Resultado corpo de prova 6 de 7



	Máximo Força [kN]
1	7,35

Fonte: Arquivo pessoal

Figura 36: Resultado corpo de prova 7 de 7



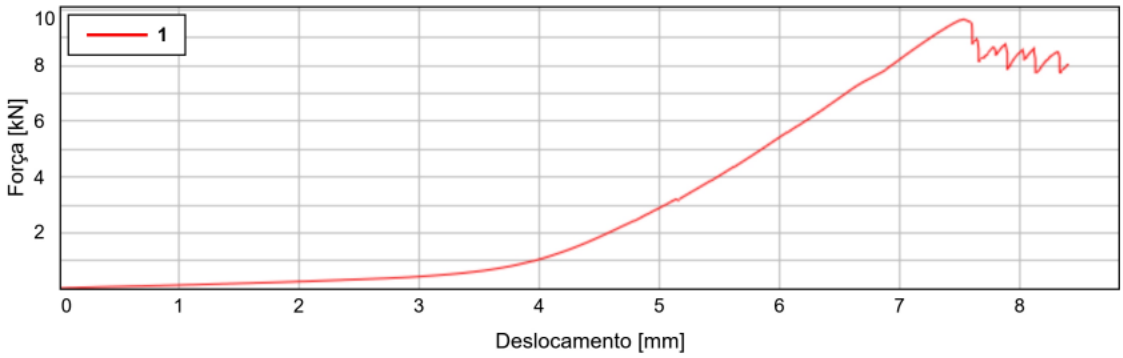
	Máximo Força [kN]
1	7,23

Fonte: Arquivo pessoal

2. Lote prozido com o traço obtido através da mistura de magnetitas com adição de rejeito fino

Nas Figuras 37 a 43 é possível observar os resultados obtidos através da ruptura dos corpos de prova na prensa universal

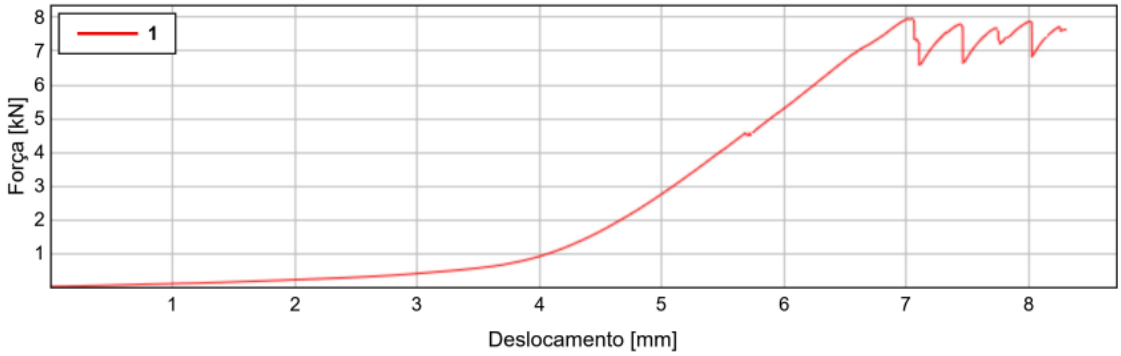
Figura 33: Resultado corpo de prova 1 de 7



	Máximo Força [kN]
1	9,66

Fonte: Arquivo pessoal

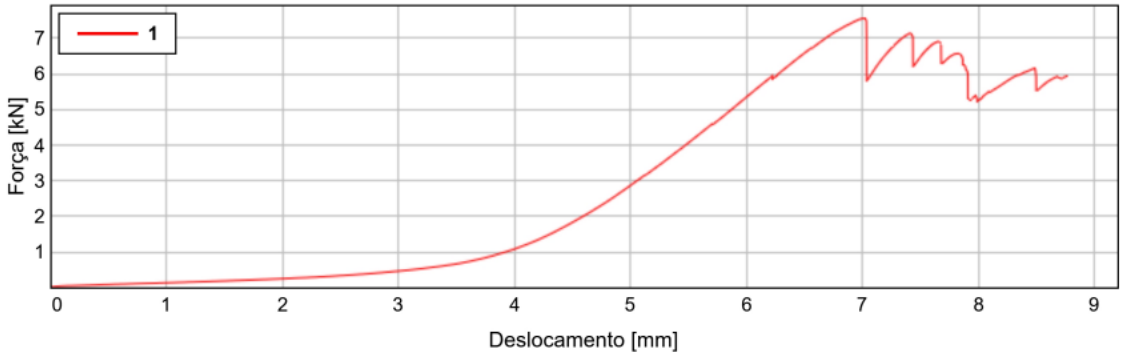
Figura 34: Resultado corpo de prova 2 de 7



	Máximo Força [kN]
1	7,98

Fonte: Arquivo pessoal

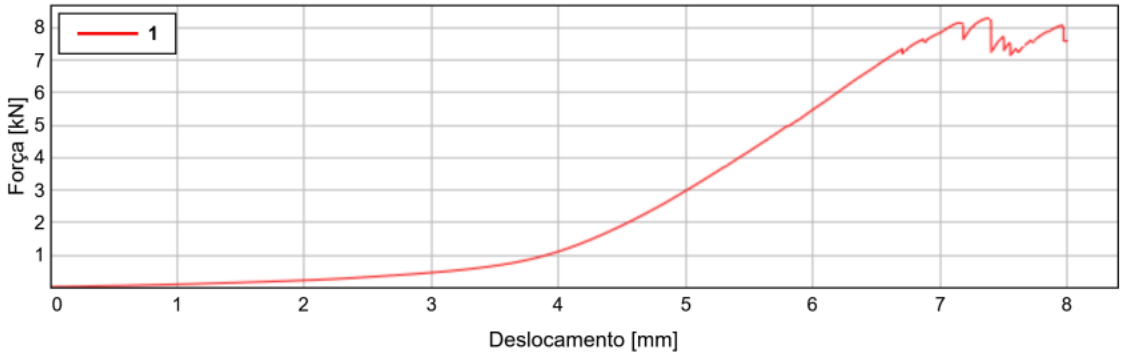
Figura 39: Resultado corpo de prova 3 de 7



	Máximo Força [kN]
1	7,56

Fonte: Arquivo pessoal

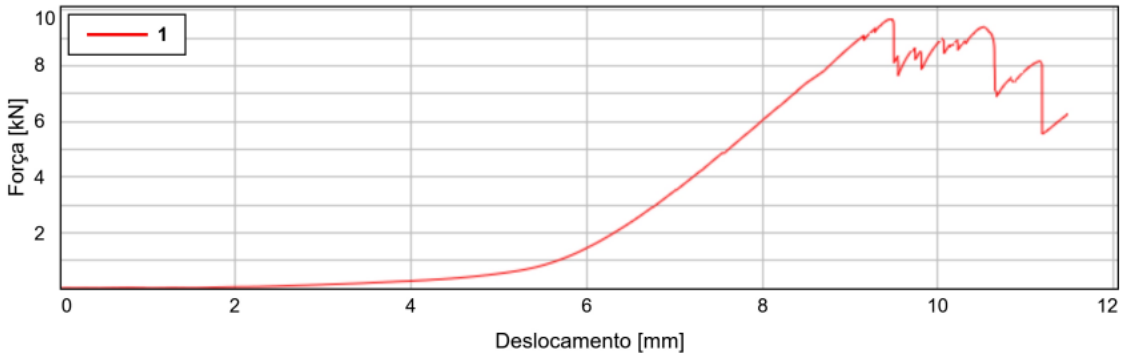
Figura 40: Resultado corpo de prova 4 de 7



	Máximo Força [kN]
1	8,30

Fonte: Arquivo pessoal

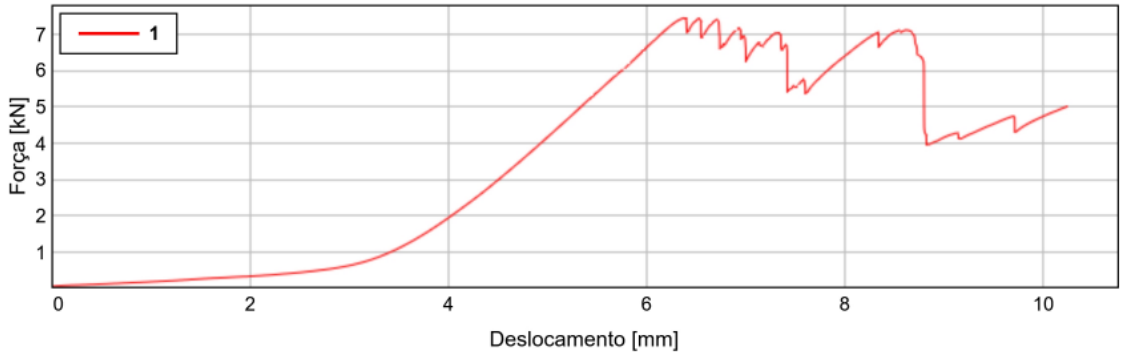
Figura 351: Resultado corpo de prova 5 de 7



	Máximo Força [kN]
1	9,68

Fonte: Arquivo pessoal

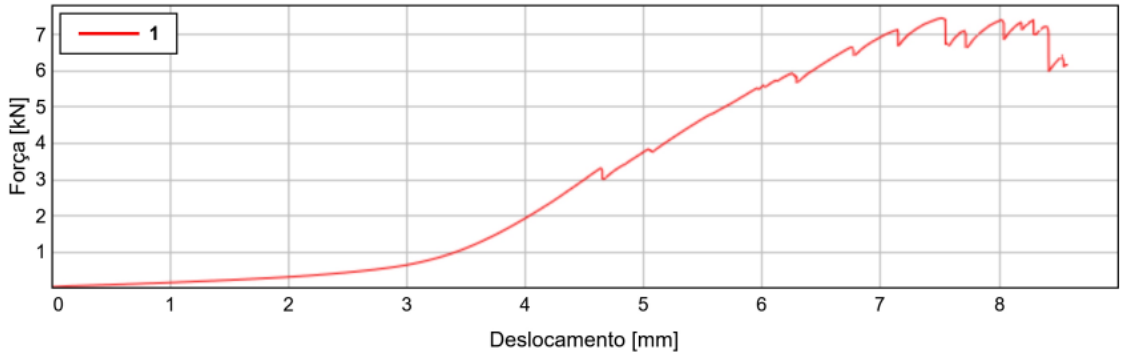
Figura 362: Resultado corpo de prova 6 de 7



	Máximo Força [kN]
1	7,45

Fonte: Arquivo pessoal

Figura 43: Resultado corpo de prova 7 de 7



	Máximo Força [kN]
1	7,45

Fonte: Arquivo pessoal