

MIGUEL RODRIGUES PASCHOAL

**USO DE REJEITO DA MINERAÇÃO DE CAULIM NA FABRICAÇÃO DE TIJOLO
SOLO-CIMENTO**

Belém-PA
2023

MIGUEL RODRIGUES PASCHOAL

**USO DE REJEITO DA MINERAÇÃO DE CAULIM NA FABRICAÇÃO DE TIJOLO
SOLO-CIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará – Campus Belém, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Jaime Henrique Barbosa da Costa

Belém-PA
2023

MIGUEL RODRIGUES PASCHOAL

**USO DE REJEITO DA MINERAÇÃO DE CAULIM NA FABRICAÇÃO DE
TIJOLO SOLO-CIMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-graduação em Engenharia de
Materiais – PPGEMAT/IFPA Campus
Belém, como requisito para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia de
Materiais.

Belém, 14 de fevereiro de 2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jaime Henrique Barbosa da Costa – Orientador
Instituto Federal do Pará/Campus Belém/PPGEMAT

Prof. Dr. Laercio Gouvea Gomes – Membro Interno
Instituto Federal do Pará/Campus Belém/PPGEMAT

Prof. Dr. Oscar Jesus Choque Fernandez – Membro Interno
Instituto Federal do Pará/Campus Belém/PPGEMAT

Prof. Dr. Alisson Clay Rios da Silva – Membro Externo
Universidade Federal do Pará/PPGCEM

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à Deus,
que sustenta a minha vida
todos os dias. A meu pai falecido
e minha mãe que sempre trabalharam
duro para que pudesse chegar até aqui.
A minha noiva e familiares que me apóiam
em todos os meus projetos.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela vida, pelo carinho, amor e realizações conquistadas.

Aos meus pais, minha noiva e toda a minha família que sempre me apoiaram em meus estudos.

Ao Prof. Dr. Jaime Henrique Barbosa da Costa, pela orientação, dedicação, paciência para realização desse trabalho.

A Empresa de Mineração Imerys S.A. que forneceu e autorizou o uso do rejeito da mineração de caulim para este estudo.

Ao IFPA Campus Belém e os laboratórios onde algumas análises foram realizadas.

Ao IFPA Campus Castanhal por destinar um transporte e um motorista para buscar o material no município de Ipixuna, no Estado do Pará e os laboratórios onde algumas análises foram realizadas.

Aos meus amigos de trabalho Wagner Roberto Santos dos santos e Jefferson Dias Gonçalves, que me ajudaram em diversas ocasiões para a realização deste trabalho.

Aos Profs. Drs. Oscar, Laércio e Alisson que aceitaram estar na banca de avaliação deste trabalho.

Aos professores do Programa de Pós-graduação em Engenharia dos Materiais (PPGEMAT) do IFPA Campus Belém, pelos ensinamentos durante o curso.

RESUMO

Os materiais que são produzidos na indústria da mineração geram rejeitos que por não apresentarem valor econômico, são armazenados conforme legislação específica, no entanto, ainda apresentam um risco potencial de causar impactos ambientais ao meio ambiente. Este trabalho teve como objetivo utilizar o rejeito da mineração de caulim no Estado do Pará, para a fabricação de um tijolo solo-cimento em substituição parcial da areia nas porcentagens 10%, 20%, 30% e 40%. O solo arenoso foi caracterizado química e mineralogicamente e a amostra de rejeito de caulim foi submetida às caracterizações química, mineralógica, morfológica e física para a determinação do traço para a fabricação do tijolo de acordo com a norma ABNT NBR 8491:2012. Os resultados da caracterização do solo arenoso indicaram o SiO_2 com teor acima de 97% e a fase mineralógica do mineral quartzo. A análise química do rejeito da mineração de caulim identificou a presença de SiO_2 (82,96%) e Al_2O_3 (15,11%); sendo a fase mineralógica do quartzo predominante, seguido da caulinita; a análise morfológica mostrou grãos com formatos pseudohexagonais e em camadas empilhadas e outros com formas arredondadas e angulares, característicos de caulinita e quartzo respectivamente; na análise física obteve um índice de plasticidade inferior à 7,74% e limite de liquidez abaixo de 45%, característicos de solos arenosos; a análise granulométrica realizada no rejeito de caulim, o classificou como predominantemente de areia fina com uma porção de silte/argila, o mesmo ensaio realizado no solo arenoso o classificou como predominantemente constituído de areia média, com uma porção de areia grossa. No ensaio de resistência à compressão, somente os tijolos de solo-cimento dos traços que continham 20%, 30% e 40% de rejeito de mineração de caulim estavam de acordo com o que a norma exige; no ensaio de absorção de água, somente o traço contendo 0% de rejeito de caulim foi recusado na média dos valores obtidos e os traços contendo 20% e 30% apresentaram os melhores resultados; o traço contendo 30% de rejeito de caulim foi o mais indicado para a fabricação do tijolo de solo-cimento por apresentar os melhores resultados e utilizar mais rejeito que o de 20%.

Palavras Chaves: Rejeito da mineração. Caulim. Tijolo solo-cimento.

ABSTRACT

The materials that are produced in the mining industry generate waste that, because they do not have economic value, are stored according to specific legislation, however, they still present a potential risk of causing environmental impacts to the environment. This work aimed to use the kaolin mining tailings in the State of Pará, for the manufacture of a soil-cement brick in partial replacement of sand in the percentages 10%, 20%, 30% and 40%. The Sandy soil was chemically and mineralogically characterized and the kaolin tailings sample was subjected to chemical, mineralogical, morphological and physical characterizations for the determination of the trait for the manufacture of the brick, according to the norm ABNT NBR 8491:2012. The results of characterization of the Sandy soil indicated SiO_2 content above 97% and the mineralogical phase of the mineral quartz. Chemical analysis of the kaolin mining tailings identified the presence of SiO_2 (82.96%) and Al_2O_3 (15.11%); being the mineralogical phase of predominant quartz, followed by kaolinite; the morphological analysis showed grains with pseudohexagonal shapes and in stacked layers and others with rounded shapes and angular, characteristic of kaolinite and quartz respectively; in the physical analysis, it obtained a plasticity index lower than 7.74% and a liquid limit below 45%, characteristic of sandy soils; the granulometric analysis carried out on the kaolin waste classified it as predominantly fine sand with a portion of silt/clay, the same test carried out on the sandy soil classified it as predominantly consisting of medium sand, with a portion of coarse sand. In the compressive strength test, only the soil-cementbricks of the mixes that contained 20%, 30% and 40% of kaolin mining tailings were in accordance with what the standard requires; in the water absorption test, only the mix containing 0% kaolin waste was rejected in the average of the values obtained and the mixes containing 20% and 30% showed the best results; the mix containing 30% kaolin waste was the most suitable for the manufacture of soil-cement bricks, as it presented the best results and used more waste than the 20% mix.

Keywords: Mining tailings. Kaolin. Soil-cementbrick.

Lista de Figuras

Figura 1 – Minerais do grupo da caulinita em escala macroscópica.....	16
Figura 2 – Estrutura cristalina da caulinita.....	17
Figura 3 – Mina de extração de Caulim	19
Figura 4 - Planta de processamento mineral	19
Figura 5 – Fluxograma Simplificado do beneficiamento do caulim via úmida	20
Figura 6 – Instalações da Imerys	22
Figura 7 - Tijolo maciço e vazado	25
Figura 8 - Localização da Mina IRCC da empresa Imerys	27
Figura 9 - Amostra de rejeito da mineração de caulim em forma de polpa	28
Figura 10 - Fluxograma da metodologia do trabalho	29
Figura 11 Esquema da amostra no Casagrande.....	32
Figura 12 – Caixa de prensagem dos tijolos de solo-cimento.....	35
Figura 13 – Mistura sendo colocada na caixa de prensagem	35
Figura 14 – Tijolos após prensagem	36
Figura 15 – Tijolo sendo desenformado.....	36
Figura 16 – Esquema da preparação dos corpos de prova para o ensaio de compressão	38
Figura 17 – Corpo de prova preparado para o ensaio de compressão	38
Figura 18 – Prensa para o ensaio de compressão	39
Figura 19 – Corpo de prova sendo submetido ao ensaio de compressão.....	40
Figura 20 – Corpo de prova rompido.....	40
Figura 21 – Corpos de prova imersos em água	41
Figura 22 – Resultado da análise mineralógica de Difração de Raios-X do rejeito de caulim.....	43
Figura 23 – Resultado da análise mineralógica de Difração de Raios-X do solo arenoso.....	44
Figura 24 – Grãos de caulinita no Microscópio Eletrônico de Varredura	46
Figura 25 – Grãos de caulinita no Microscópio Eletrônico de Varredura	47
Figura 26 – Grãos de caulinita no Microscópio Eletrônico de Varredura	47
Figura 27 – Curva Granulométrica do rejeito da mineração de caulim.....	49
Figura 28 – Curva Granulométrica do solo arenoso	51
Figura 29 – Média dos resultados de Resistência à Compressão	53
Figura 30 – Média dos resultados de Absorção de Água	56

Lista de Tabelas

Tabela 1 – Dimensões Nominais do tijolo de solo-cimento	26
Tabela 2 - Composição dos traços em partes 1:8.....	34
Tabela 3 – Resultado da análise química por Fluorescência de Raios-X do Rejeito de Caulim e do solo arenoso.....	45
Tabela 4 - Resultado da análise física de Limites de Consistência de Atterberg (%)	45
Tabela 5 - Resultado da Análise Granulométrica do rejeito da mineração de caulim	48
Tabela 6– Classificação das partículas ABNT NBR 6502:1995	49
Tabela 7 - Resultado da Análise Granulométrica da areia	50
Tabela 8 – Resultado da análise dimensional nos corpos de prova	52
Tabela 9 – Valores individuais de resistência à compressão.....	54
Tabela 10 – Resultado da Análise de Absorção de água nos corpos de prova.....	55

Lista de Abreviaturas, Símbolos e Siglas

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas

ANM Agência Nacional de Mineração

FUNTAC Fundação de Tecnologia do Estado do Acre

IBRAM Instituto Brasileiro de Mineração

IEP Instituto Educacional Piracicabano

IP Índice de Plasticidade

IPEA Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

LL Limite de Liquidez

LP Limite de Plasticidade

MEV Microscopia Eletrônica de Varredura

NBR Norma Brasileira

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	12
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL.....	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
3.1 O CAULIM	16
3.2 BENEFICIAMENTO DO CAULIM E GERAÇÃO DO REJEITO	19
3.3 ESTUDOS DE APROVEITAMENTO DE REJEITOS.....	23
3.4 TIJOLO DE SOLO-CIMENTO	25
4 MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
4.1 MATERIAIS	27
4.2 MÉTODOS.....	28
4.2.1 Preparação das Amostras para Análise.....	29
4.2.2 Caracterização Mineralógica	30
4.2.3 Caracterização Química.....	30
4.2.4 Caracterização Física.....	30
4.2.4.1 Índice de Atterberg	30
4.2.4.2 Determinação do Limite de Liquidez	31
4.2.4.3 Determinação do Limite de Plasticidade	32
4.2.5 Caracterização Morfológica	32
4.2.6 Análise Granulométrica.....	32
4.2.7 Determinação dos traços das composições do tijolo de solo-cimento	33
4.2.8 Fabricação dos Tijolos de Solo-Cimento.....	34
4.6 ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS NOS CORPOS DE PROVA	37
4.6.1 Análise Dimensional.....	37
4.6.2 Resistência dos corpos de prova	37
4.6.3 Absorção de água.....	41
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	43
5.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO	43
5.1.1 Análise Mineralógica.....	43
5.1.2 Análise Química	44
5.1.3 Limite de Liquidez e Plasticidades	45
5.1.4 Análise Morfológica	46
5.1.5 Análise Granulométrica.....	48

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS NOS CORPOS DE PROVA.....	51
5.2.1 Análise dimensional	51
5.2.2 Análise de resistência à compressão.....	52
5.2.3 Análise de absorção de água.....	54
6 CONCLUSÃO.....	57
REFERÊNCIAS	58

1 INTRODUÇÃO

O crescimento do setor industrial no Brasil e no mundo trouxe uma série de vantagens, entre elas o avanço da tecnologia, desenvolvimento do setor econômico e a produção de materiais e bens necessários para sobrevivência da sociedade. No entanto trouxe também desvantagens, pois a fabricação desses produtos essenciais para a sociedade gera poluição ao meio ambiente, chamado de resíduos industriais (GANZALA, 2018).

A produção desses resíduos, que em certos casos acabam tendo como destino o meio ambiente, aliada à exploração dos recursos naturais, pode acarretar em sérios impactos ambientais (ANJOS e NEVES, 2011). A poluição gerada pelos resíduos estava sendo “encarada” como uma consequência necessária para o desenvolvimento da sociedade desde os tempos da Revolução Industrial, esse pensamento vem mudando atualmente, onde as práticas de desenvolvimento sustentável são possíveis de serem incluídas nos planos de crescimento da sociedade (SANTOS, 2005).

Devido à falta de programa de incentivos à reciclagem, o volume de resíduos multiplica-se a cada ano. Nas atividades de mineração e beneficiamento, o volume de resíduos gerados vem se intensificando devido ao aumento da demanda provocado pelo crescimento da economia mundial (MENEZES, 2007a). Por outro lado, a tecnologia e a pesquisa atuam como aliadas na apresentação de soluções que minimizem essa degradação ambiental.

A preocupação com o meio ambiente e a escassez de recursos naturais tem levado a sociedade a buscar alternativas alinhadas com novos conceitos e técnicas de crescimento sustentável, pois nos dias atuais, a sustentabilidade das atividades econômicas tem sido um dos principais desafios enfrentados pela humanidade (SANTOS, 2005).

As indústrias que trabalham com beneficiamento mineral, como o de caulim, vêm preocupando os ambientalistas devido à enorme quantidade de resíduos gerados, que estão sendo lançados no ecossistema sem nenhum processo de tratamento para eliminar ou reduzir seus constituintes presentes (MENDONÇA et al, 2017). Somente em 2005, foram gerados cerca de 4,3 milhões toneladas de rejeitos

de caulim provenientes da mineração, com uma projeção para 5.110 milhões toneladas para o ano de 2030 (IPEA, 2012).

O caulim é uma rocha que é formada de um material argiloso, que possui uma granulometria fina e apresenta uma cor branca, alem de na maioria das ocasiões apresentar baixos teores de ferro, tendo diversas aplicações, principalmente nos segmentos de cerâmicos, pigmentos e papel (LUZ, 2008).

Na etapa de beneficiamento do caulim, são gerados dois tipos de rejeitos, chamados “resíduo grosso” e “resíduo fino”. O resíduo grosso corresponde a cerca de 70% do resíduo produzido, é gerado logo após a extração, na primeira etapa de beneficiamento, onde ocorre a separação do quartzo do minério de caulim; o resíduo fino é originado na segunda etapa de beneficiamento, onde ocorre a purificação do minério (ANJOS e NEVES, 2011).

O uso dos resíduos industriais como forma de aproveitamento no setor da construção civil é possível, pois é capaz de reduzir e/ou eliminar o rejeito, além de suprir a grande demanda de materiais que o setor exige (SIQUEIRA, 2012).

O reaproveitamento dos resíduos sólidos promove a redução da extração de recursos naturais não renováveis do planeta, diminui a poluição da atmosfera, dessa forma contribuindo para a diminuição do impacto ambiental (SOUSA et al, 2020). Para Siqueira et al (2012), o uso de resíduos sólidos provenientes de ação industrial como fonte de matéria-prima alternativa na construção civil vem sendo cada vez mais utilizado por apresentar vantagens do ponto de vista técnico, ambiental e econômico.

Diante de tais aspectos verifica-se a necessidade de métodos alternativos que possibilitem o reaproveitamento dos resíduos, pois além de reduzir os impactos que eles poderiam causar ao meio ambiente, ainda contribui na produção de novos materiais, economizando o emprego de matéria-prima e insumos.

Este trabalho tem como finalidade oferecer um destino alternativo ao excesso de rejeitos gerados pelas indústrias de beneficiamento de caulim, visando proporcionar soluções ambientalmente corretas.

O produto final esperado na pesquisa corresponde a compreensão da tecnologia necessária para a fabricação e utilização dos tijolos de solo-cimento, segundo a norma ABNT NBR 8491:2012, misturando cimento portland e o rejeito da mineração do caulim, avaliando as vantagens em relação aos tijolos ou blocos

cerâmicos sem adição de rejeito. Mostrando assim um novo produto para sistemas construtivos sustentáveis.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Verificar a viabilidade técnica da produção de um tijolo de solo-cimento, a partir da substituição parcial do solo pelo rejeito da mineração de Caulim nas proporções 10, 20, 30 e 40%.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar a caracterização física, química e mineralógica do rejeito e do solo;
- Produzir o tijolo de solo-cimento;
- Realizar ensaios físicos e mecânicos nos tijolos de solo-cimento;
- Escolher a mistura mais adequada para a fabricação de tijolos de solo cimento.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 O CAULIM

O caulim é o nome dado à rocha que contém o argilomineral caulinita, que faz parte do grupo de minerais que chamado também de caulinita, que é composto também de dickita, nacrita, haloisita (incluindo as suas metaformas e associados alofanos) e a imogolita. O grupo em questão é caracterizado como filosilicatos e apresentam uma composição química formada pelos elementos Al, O, H e Si (DILL, 2016).

A Caulinita possui a fórmula estrutural $\text{Al}_4\text{Si}_4\text{O}_{10}(\text{OH}_8)$ e a sua composição química é composta de 46,54% (SiO_2); 39,50% (Al_2O_3) e 13,96% (H_2O) (LUZ et al, 2008).

A Figura 1 apresenta o grupo da caulinita em escala macroscópica, na sequência (a) caulinita; (b) dickita (branco), alternando pirofilita em tonalidade rosada e sobreposta por uma alunita em cinza; (c) Dickita; (d) nacrita (rosa) e caulinita (branco rosado); (e) Haloisita e (f) alofano (DILL, 2016).

Figura 1 – Minerais do grupo da caulinita em escala macroscópica



Fonte: DILL (2016).

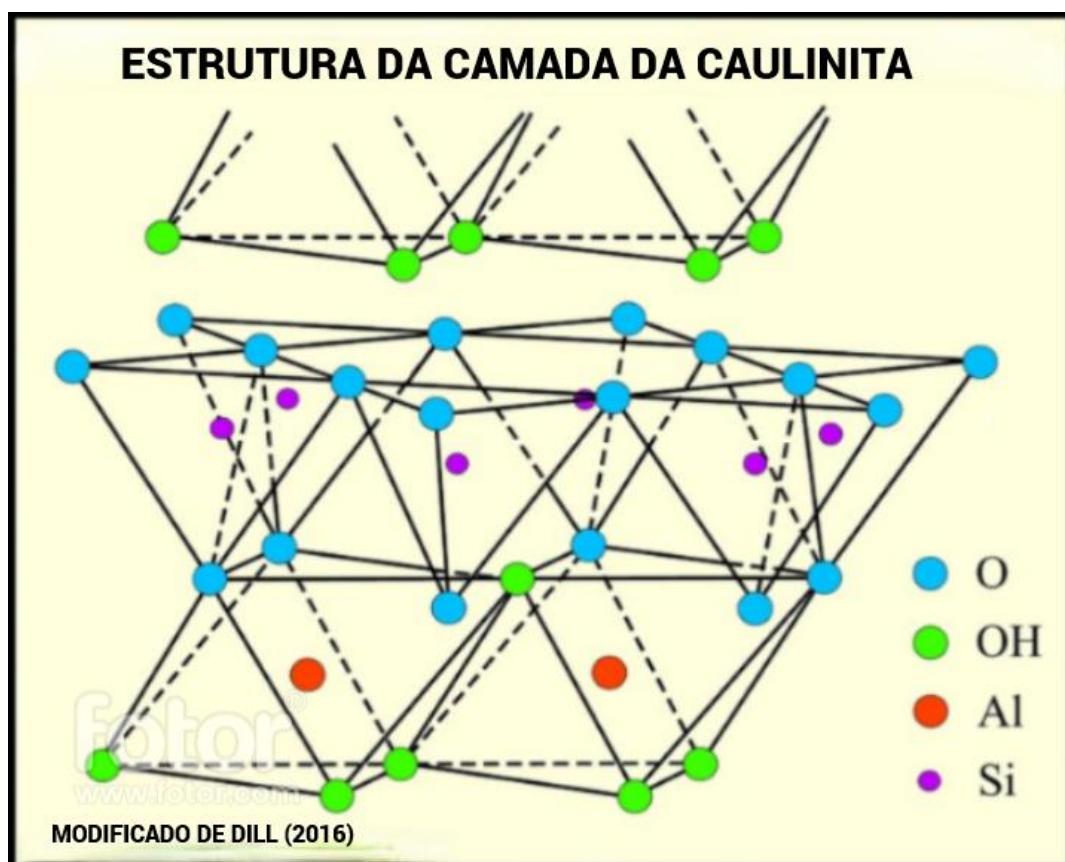
A definição de caulim de acordo com GlossaryofGeologyofthe American GeologicalInstitute (BATES e JACKSON, 1997) compreende tanto a definição citada

no parágrafo anterior quanto o de rochas cuja predominância seja de minerais do grupo caulinita, acompanhadas de minerais de mica, feldspato, quartzo.

O mineral do grupo caulinita mais importante para a indústria é a caulinita, que apresenta a fórmula química $[Al_2Si_2O_5(OH)_4]$, podendo ser utilizada na produção de materiais cerâmicos, pigmentos, plástico, papel, fibras de vidro e outras aplicações (BERTOLINO et al, (2012).

A estrutura cristalina da caulinita é composta de uma folha tetraédrica (composta de SiO) e octaédricas (constituída de $Al(OH)_3$) ligadas, formando a camada 1:1 empilhada dioctaédrica (SILVA E SANTANA, 2013). A Figura 2 apresenta a estrutura cristalina da caulinita.

Figura 2 – Estrutura cristalina da caulinita



Fonte: DILL (2016).

Os elementos que fazem parte da composição química do grupo caulinita compõem 75% das rochas sedimentares da crosta terrestre continental, tornando a caulinita um mineral bem distribuído e empregado (DILL, 2016).

Os depósitos de caulim podem ser do tipo primário e secundário. Existem algumas divergências sobre a classificação dos depósitos de caulim, o caulim primário pode ser classificado em hidrotermais, intemperizados e solfataras (LUZ et al, 2008). O autor também classifica os caulinins secundários como sedimentares, areias cauliníticas e argilas plásticas, refratárias e silicosas (LUZ et al, 2008,). Para DILL(2016), os depósitos de caulim estão divididos em intemperizados, hidrotermais, solfataras e misturado. No estudo de DILL (2016) foi observada também a proposta de classificação do caulim em depósitos residuais de caulim/depósitos primários; depósitos hidrotermais de caulim/depósitos primários; caulim sedimentar e argila caulinítica/depósitos secundários.

Segundo dados do Instituto Brasileiro de Mineração (2012), o Brasil ocupava a posição de 5º colocado dos maiores produtores de caulim, em 2011 produziu cerca de 2,05 milhões de toneladas de caulim, correspondendo a 6,2% da produção do minério mundial, ficando atrás do Uzbequistão, Estados Unidos, Alemanha e República Tcheca. Em 2017 o Brasil chegou a produzir cerca de 1,77 milhões de toneladas de Caulim, ocupando a oitava posição mundial de produção do material, as grandes mineradoras encontram-se concentradas no norte do País, sendo as duas maiores no município de Ipixuna do Pará, no Estado do Pará (CAMPOS e FARIAS, 2017).

Até 2019 o Brasil já contava com cerca de 160 minas/unidades produtoras de caulim, exportando cerca de 153 milhões de toneladas de minérios e bens minerais e 1,4 milhões de toneladas de produtos originários do caulim, ocupando a 7ª posição em exportação do mineral (IBRAM, 2020). Na Figura 3 pode-se visualizar a mina a céu aberto, de extração de caulim localizada na cidade de Ipixuna no Estado do Pará; na Figura 4 pode-se observar uma planta de processamento de mineral seco no condado de Cornwall, na Inglaterra.

Figura 3 – Mina de extração de Caulim



Fonte: Imerys(2022).

Figura 4 - Planta de processamento mineral



Fonte: Imerys (2021).

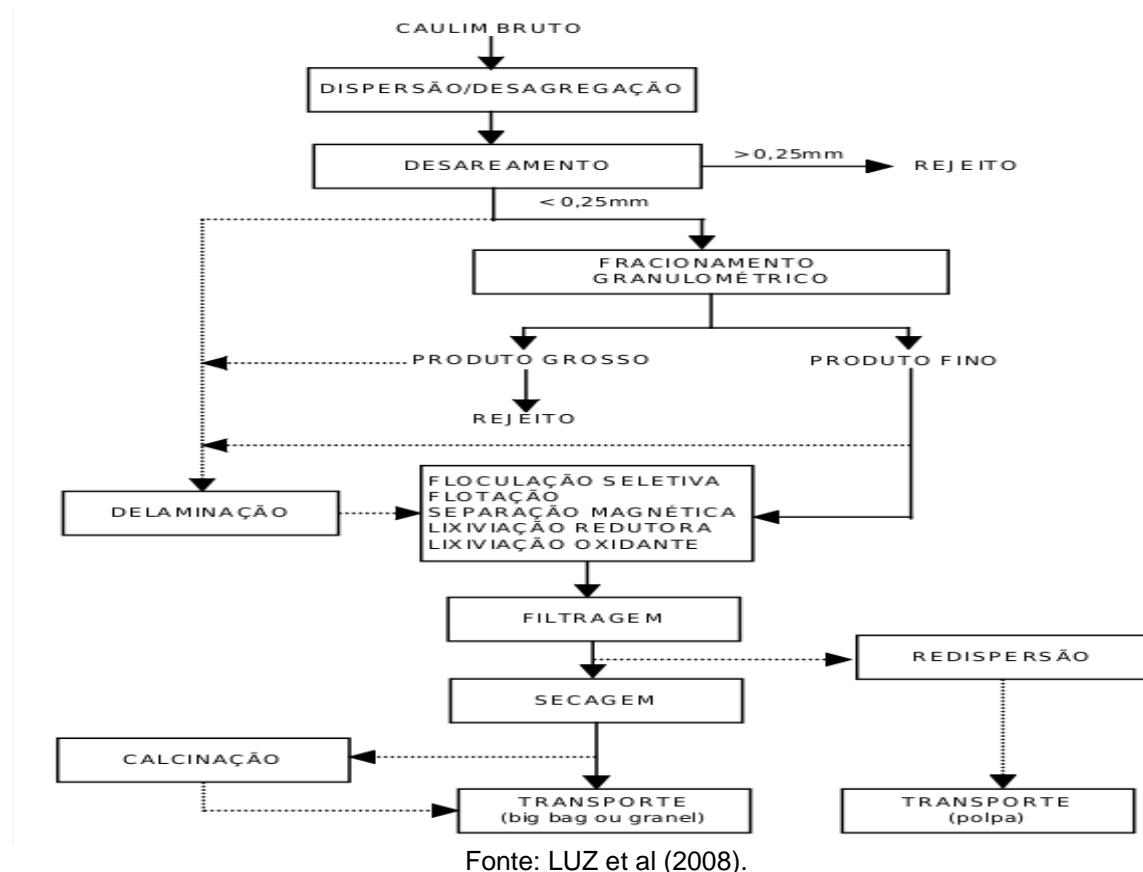
3.2 BENEFICIAMENTO DO CAULIM E GERAÇÃO DO REJEITO

A caulinita, assim como a maioria dos minerais não são encontrados puros e sim associados a outros minerais, logo o caulim após ser extraído da mina, precisa passar pelo processo de beneficiamento para a separação das impurezas e assim a sua adequação ao uso industrial (BERTOLINO et al, 2012). Os minerais que normalmente são encontrados junto à caulinita são o quartzo, cristobalita, alunita,

muscovita, clorita, gibbsita, feldspato, esmectita, haloisita, anatásio, ilita, biotita e pирита, esses minerais conhecidos como ganga podem afetar as propriedades que são de interesse para a indústria, como sua viscosidade, alvura e abrasividade (LUZ et al, 2008).

O beneficiamento pode ocorrer via dois processos, o primeiro é via seca onde o caúlim bruto é submetido à britagem para a fragmentação do material e sua adequação para as próximas etapas; em seguida colocado para secagem em secadores rotativos e pulverizado no moinho de rolos; sendo finalmente classificado através do processo de flotação com ar, onde ocorre uma segregação das partículas pelo seu tamanho, através de uma corrente de ar, que conduz as partículas mais finas para o ponto mais alto do aero-separador (LUZ et al, 2008). O segundo processo de beneficiamento de caúlim ocorre por via úmida, o fluxograma pode ser visto na Figura 5.

Figura 5 – Fluxograma Simplificado do beneficiamento do caúlim via úmida



No beneficiamento por via úmida, o caúlim após ser extraído da mina é primeiramente submetido à etapa de dispersão, onde através de agitadores móveis, adição de água, o dispersante químico e reagentes que vão regular o pH, o caúlim bruto é transformado em polpa; em seguida segue para o desareamento, etapa em que as partículas com granulometria superior à malha #60 (0,25 mm) são removidas, com auxílio de peneiras e tanques de sedimentação. O material segue para a etapa de fracionamento granulométrico, onde ocorre uma separação das partículas por tamanho através de tanques de sedimentação, hidrociclos ou centrífugas (LUZ et al, 2008).

Após o fracionamento granulométrico, o material é dividido entre produto grosso e produto fino, o grosso segue ou para a área de rejeitos ou para a etapa de delaminação, onde sua capacidade de cobertura, reforço e alvura são melhoradas. O produto fino segue para a separação magnética, onde impurezas que irão afetar a alvura do caúlim são removidas; quando necessário, o material precisa passar pelas etapas de flocação seletiva, lixiviação oxidante e seletiva, para alcançar a alvura pretendida; caso o caúlim apresente uma grande quantidade de quartzo ou rutilo/anatásio e encontra-se em uma granulometria muito fina, é submetido à flotação para remoção dessas impureza que aumentam a capacidade abrasiva do caúlim; por fim o produto é levado para filtragem através de filtros prensa, para reduzir a sua umidade e secagem por atomização com spray dryer (LUZ et al, 2008).

O beneficiamento por via seca é mais raro de acontecer devido porque somente pode ser utilizado quando o caúlim no estado natural já encontra-se em uma distribuição granulométrica e alvura adequadas para a necessidade do mercado, prevalecendo a utilização do beneficiamento por via úmida (LUZ et al, 2008). Nesse processo é gerado o rejeito, que não será aproveitado e seguirá para o descarte, na maioria das vezes para uma barragem de rejeitos. Na Figura 6 pode-se observar Instalações da Imerys no município de Barcarena, no Estado do Pará, desde a planta de beneficiamento, até a bacia de rejeitos.

Figura 6 – Instalações da Imerys



Fonte: Imerys (2021).

De acordo com a Agência Nacional de Mineração, em 2017 o beneficiamento de caulim gerou cerca de 3,33 milhões de toneladas de rejeitos no Brasil, que por não ser aproveitado pela indústria do caulim, provavelmente foi destinado à bacia de rejeitos (CAMPOS e FARIAS, 2017).

Para Farias et al (2020), os rejeitos oriundos da indústria são uma das maiores ameaças ao meio ambiente, devido a presença de metais pesados que são capazes de causar variados tipos de poluição em rios, no solos, no ar e nos animais. Existem muitas formas de remover esses contaminantes através de processos como remoção de biomassa através de plantas aquáticas, emprego de microrganismos ou precipitação.

Atualmente várias pesquisas estão sendo desenvolvidas com o intuito de reaproveitar os resíduos (seja da mineração ou da construção civil) na fabricação de outros materiais, oferecendo uma alternativa para esses produtos que tinham como destino na maioria das vezes o despejo no meio ambiente e reduzir o consumo de recursos naturais (MEIRELES et al, 2022).

Estudos relacionados com o reaproveitamento de rejeitos da mineração do Estado do Pará vêm ganhando destaque nos últimos anos, onde de 2010 até 2020 foi constatado um aumento do número de trabalhos a respeito deste tema que foram publicados, com um destaque o reaproveitamento do rejeito da mineração de caulim,

que apresentou o maior número de trabalhos sobre o referido assunto (COSTA e BERGERMAN, 2022).

Para Pinto et al (2019), faz-se necessária a realização de uma gestão ambiental efetiva com o intuito de efetuar um gerenciamento de resíduos e evitar o seu acúmulo. Algumas empresas destinam o seu rejeito para unidades de tratamento o que acaba gerando um custo adicional para empresa que gerou o resíduo (AMIN et al, 2017), logo o reaproveitamento desses materiais pode resultar em uma redução de gastos. A reutilização de materiais oferece também a possibilidade de manutenção do meio ambiente para as gerações futuras. Para Sousa et al (2020), a prática de reaproveitar os resíduos na área da produção cerâmica pode contribuir para a melhora da questão socioambiental para esta ramo.

O uso de resíduos oriundos da extração ou do próprio beneficiamento mineral na produção de diversos setores tem contribuido para a redução da utilização de recursos naturais e dos impactos ambientais, alem de provocar a melhora da qualidade de vida da população de comunidades locais, através do desenvolvimento da região e surgimento de postos de trabalho (MENDONÇA et al, 2017).

3.3 ESTUDOS DE APROVEITAMENTO DE REJEITOS

No estudo realizado por Ignacio et al (2020), onde se utilizou cinzas do bagaço da cana-de-açúcar na produção de tijolos solo-cimento, verificaram-se que estes produzidos sobre uma determinada mistura eram 2,08% mais resistentes, 84% mais resistentes a dobrar e 7,03% mais leves que os tijolos do grupo de controle, reduzindo assim o uso de argila em 30%.

Amin et al (2017) utilizou o resíduo fino cerâmico da fabricação de azulejos que ficou retido em ciclones para a fabricação de tijolos geopoliméricos, através dos testes realizados durante 28 dias, constataram que força de compressão aumentou com o grau da geopolimerização, reduzindo assim os custos de fabricação de tijolos.

Lemos et al (2019) confeccionou tijolos de solo-cimento utilizando rejeitos das minerações de quartzito e rocha fosfática, obtendo resultados satisfatórios tanto no processo de moldagem, como nos ensaios de resistência à compressão e absorção de água.

Na pesquisa de Nascimento et al (2013), utilizaram rejeitos de caulim de diversas empresas de mineração para sintetizar zeólitas. Como resultado, concluíram que é necessário realizar mais estudos utilizando outros métodos, pois

devido conter quartzo e muscovita como impurezas no rejeito, não foi possível a obtenção das zeólicas através do método utilizado.

Azevedo e Vital (2018) utilizaram o rejeito de caulim oriundo das indústrias de beneficiamento de caulim para produzir uma tinta ecológica junto de água e cola branca. Como resultado, constataram que o rejeito de caulim é um boa alternativa na confecção de tintas ecológicas, podendo ser utilizada na pintura de paredes internas.

O trabalho de Leandro et al (2017), utilizou o resíduo de caulim como substituto do aditivo na formulação de cimento portland. Através dos ensaios realizados envolvendo caracterização química e resistência mecânica, foi concluído que o caulim pode substituir o aditivo pozolânico na fabricação deste cimento.

No estudo de Leite e Souza (2010), verificou-se o comportamento do rejeito de caulim de mineradoras dos Estados da Paraíba e Rio grande do Norte, no concentrador centrífugo, visando maximizar o processo de recuperação de caulim destes rejeitos, alcançando cerca de 90% de recuperação de caulim.

No trabalho de Mendonça et al (2012), empregou-se massas contendo rejeitos de caulim e granito, com o intuito de estudar a expansão por umidade (EPU) de revestimentos cerâmicos. A EPU trata-se do aumento das dimensões dos materiais cerâmicos por causa da absorção de água; através dos resultados obtidos, o autor observou que os rejeitos utilizados podem ser utilizados como matéria-prima cerâmica alternativa devido apresentarem características semelhantes às que são usadas convencionalmente.

Araújo et al (2019) pesquisaram a utilização do rejeito da mineração de caulim na fabricação de cerâmica vermelha, visando tanto a redução de gastos na fabricação da cerâmica, quanto reduzir os dano ao meio ambiente. Como resultado, consideraram eficiente o uso do rejeito da mineração de caulim como matéria-prima alternativa na fabricação material pretendido.

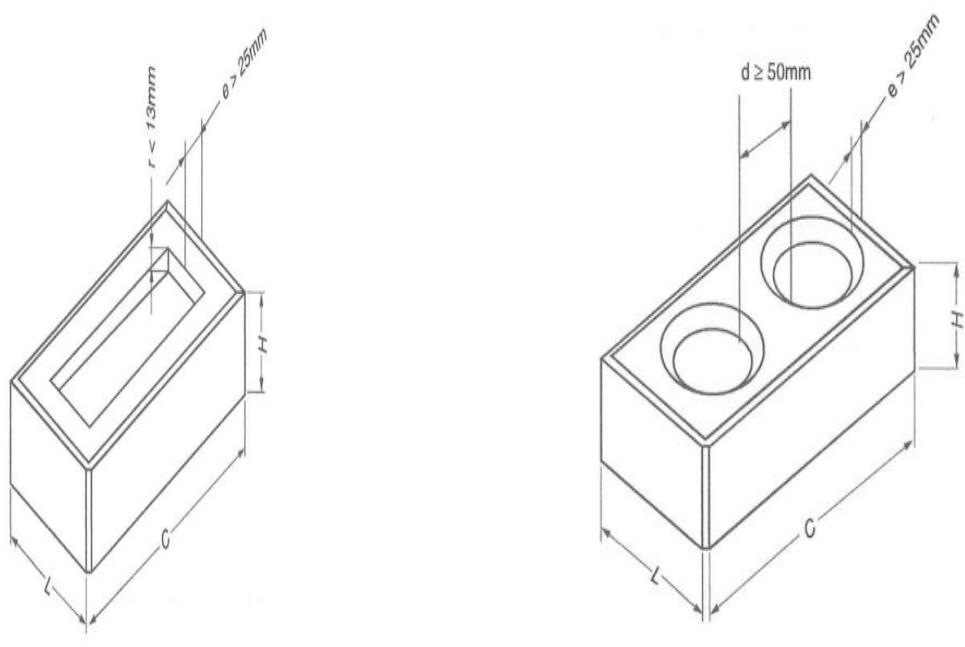
No estudo desenvolvido por Kozloski et al (2019), onde os autores puderam comparar as quantidades de emissões de CO₂ provenientes dos materiais utilizados na construção de duas residências, sendo que ambas possuem o mesmo projeto arquitetônico, mas em uma delas foi aproveitado materiais alternativos e na outra, utilizou-se materiais que são normalmente comuns à construção civil. O resultado deste estudo comprovou a eficácia do aproveitamento de materiais reciclados e

alternativos na construção civil, reduzindo os impactos ambientais oriundos da construção.

3.4 TIJOLO DE SOLO-CIMENTO

A fabricação de um tijolo segue a norma ABNT NBR 8491:2012, que estabelece os requisitos necessários que o tijolo de solo-cimento precisa apresentar; a norma conceitua o tijolo de solo-cimento como componente de alvenaria de mistura homogênea, compacta e endurecida de solo, cimento Portland, água e (se necessário) aditivos e/ou pigmentos que permitam atender aos requisitos de análise dimensional, resistência a compressão e absorção de água, podendo ser maciço ou vazado. A Figura 7 mostra os esquemas do tijolo de solo-cimento do tipo maciço (a esquerda) e vazado (a direita).

Figura 7 - Tijolo maciço e vazado



Fonte: ABNT NBR 8491:2012

O tijolo maciço apresenta um volume igual ou superior a 85% do seu volume total aparente, o vazado apresenta furos verticais e um volume total que seja inferior a 85% do volume total aparente. As dimensões nominais do tijolo de solo-cimento podem ser vistas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dimensões Nominais do tijolo de solo-cimento

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

Fonte: Adaptada de ABNT NBR 8491:2012

O tijolo deve apresentar a forma externa retangular de um paralelepípedo, sendo a altura em menor dimensão que a largura (SILVA et al, 2022). A norma ABNT NBR 8491:2012 estabelece que as dimensões do tijolo produzido podem ser diferentes das nominais, desde que a altura seja inferior ao comprimento.

O tijolo de solo-cimento também é conhecido como tijolo ecológico, em razão da ausência do processo de queima em sua fabricação e por reaproveitar resíduos ou rejeitos construção civil e/ou mineração, reduzindo assim o impacto ambiental devido à redução do consumo da matéria-prima envolvida, além do uso de um material que não tinha utilidade até o momento.

Para LEMOS et al (2019), o tijolo de solo-cimento pode ser produzido utilizando-se materiais com processos menos nocivos ao meio ambiente por não utilizar a queima e o reaproveitamento de rejeitos de descarte, além da facilidade de fabricação.

Segundo LEMOS et al (2019), a fabricação dos tijolos de solo-cimento consiste da mistura de solo, cimento e água e colocada em um molde que após o processo de prensagem e curagem, o mesmo endurece. De acordo com PINHEIRO E SOARES (2010), o material após a prensagem e secagem deve ser empilhado em local coberto e mantidos úmidos nos primeiros 7 dias.

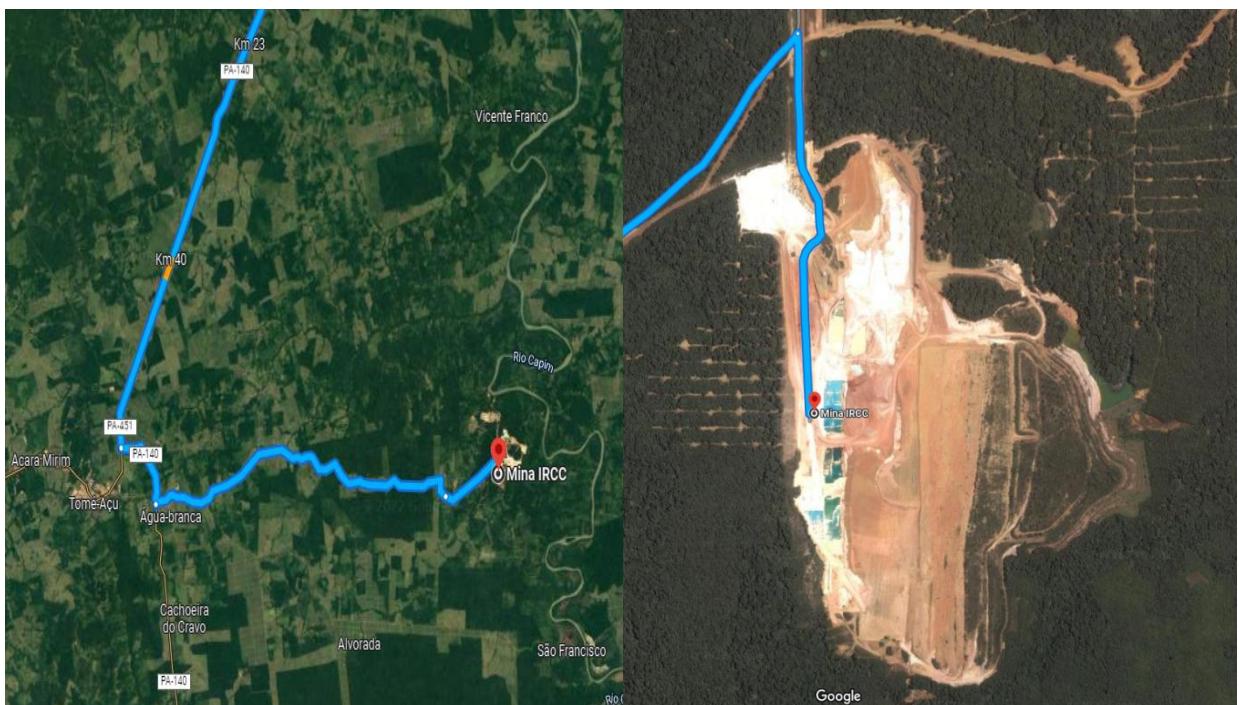
Após o processo de cura, o tijolo de solo-cimento possui alta resistência à compressão simples e baixa absorção de água. A resistência eleva-se de acordo com a quantidade de cimento for utilizada, respeitando o limite de um teor ideal, para que o tijolo alcance a qualidade exigida, sem que ocorra uma elevação desnecessária do custo para a fabricação do produto final (PINHEIRO e SOARES, 2010).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 MATERIAIS

As amostras do rejeito da mineração de caulim analisadas e estudadas foram cedidas e autorizadas para seu uso pela empresa de mineração Imerys S.A., situada no município de Ipixuna, no Estado do Pará, aproximadamente 236 km da capital 44,6 km do município de Tomé-Açu(Figura 8), a amostra foi coletada pela própria empresa após a primeira centrifugação, na etapa de fracionamento granulométrico, onde ocorre à separação do quartzo e caulinita; o material na forma de polpa acondicionado em um recipiente (Figura 9). O solo arenoso e o cimento foram adquiridos em uma estância do município de Castanhal.

Figura 8 - Localização da Mina IRCC da empresa Imerys



Fonte: Google Maps (2022).

Figura 9 - Amostra de rejeito da mineração de caulim em forma de



Fonte: Próprio autor (2021).

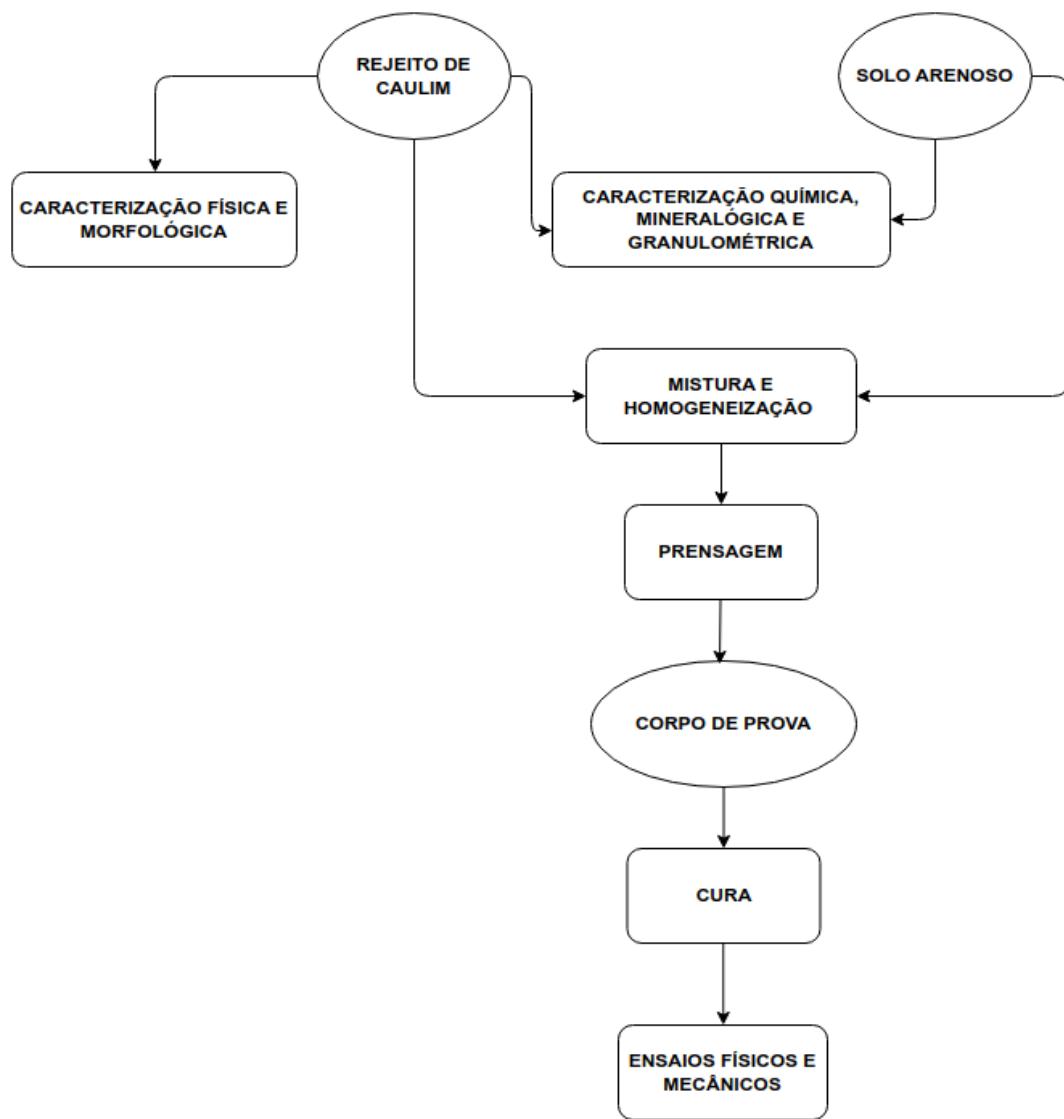
O rejeito, por se tratar da mineração de caulim, espera-se que contenha grandes concentrações de aluminossilicatos, tornando-o um solo argiloso, de acordo com as Cartilhas de Produção de Tijolo Solo-Cimento da Funtac (1999) e Cartilha de Produção de Solo Cimento do IEP (2016), para a fabricação de tijolo de solo-cimento, os melhores solos não podem ser muito argilosos e nem muito arenosos. Quando muito arenoso e pouco argiloso, o molde e a compactação ficam difíceis, o corpo de prova não se mantém coeso; quando muito argiloso, o material fica com risco de obter fissuras em sua fabricação.

4.2 MÉTODOS

O trabalho é de natureza experimental, a Figura 10 apresenta o fluxograma em que a metodologia foi desenvolvida, sendo que a primeira parte consistiu da caracterização química, física, mineralógica e morfológica do rejeito de caulim; através dos dados coletados, ocorreu a segunda parte do trabalho, onde o tijolo de solo cimento foi fabricado, utilizando-se misturas em quantidades diferentes de solo arenoso e rejeito de caulim, chamadas de traço; a terceira parte do trabalho se deu

com o ensaio nos corpos de prova, para verificar se os mesmos atendem aos requisitos da norma ABNT NBR 8491:2012.

Figura 10 - Fluxograma da metodologia do trabalho



Fonte: Autor Próprio.

4.2.1 Preparação das Amostras para Análise

As amostras de rejeito de mineração de caulim e de solo arenoso precisaram ser colocadas na estufa para a secagem por 16 horas a 105 °C e em seguida tiveram os torrões desmanchados como auxílio de almofariz e pistilo para a homogeneização e diminuição do tamanho dos grãos e assim encaminhadas para

análise morfológica (somente a amostra de rejeito de caulim), mineralógica e química.

Para os ensaios físicos de determinação limite de liquidez, plasticidade e análise granulométrica, a amostra de rejeito de caulim precisou primeiramente ser preparada de acordo com a norma ABNT NBR 6457:2016, onde o material foi levado para secagem ao ar até próximo da umidade higroscópica em seguida os torrões foram desmochados e a amostra foi homogeneizada; em seguida a quantidade do material foi reduzida até obter-se uma amostra representativa para então levá-la até as peneiras de 76 mm e 0, 42 mm, onde o material passante na primeira peneira foi utilizado no ensaio de granulometria e o passante na segunda peneira, nas determinações dos limites de liquidez e plasticidade.

4.2.2 Caracterização Mineralógica

As amostras de rejeito de caulim e solo arenoso foram caracterizadas mineralogicamente através da Difração de Raios-X, da PANalytical com radiação de Cu-K α , operando com 40 Kv e 30 mA, que foi realizada no laboratório de caracterização mineral-setor de Raios-X, do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará.

4.2.3 Caracterização Química

A caracterização química foi realizada nas amostras de rejeito da mineração de caulim e da areia, onde foram confeccionadas pastilhas prensadas para a leitura utilizando o espectrômetro de Fluorescência de Raios-X Bruker Ranger S2 com tubo de Pd no Laboratório de Caracterização de Materiais do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA) – Campus Belém.

4.2.4 Caracterização Física

4.2.4.1 Índice de Atterberg

O índice de Plasticidade ou de Atterberg é determinado através da norma ABNT NBR 7180:2016, utilizando-se a expressão:

$$IP = LL - LP \quad (1.1)$$

onde:

IP: Índice de Plasticidade (%)

LL: Limite de Liquidez (%)

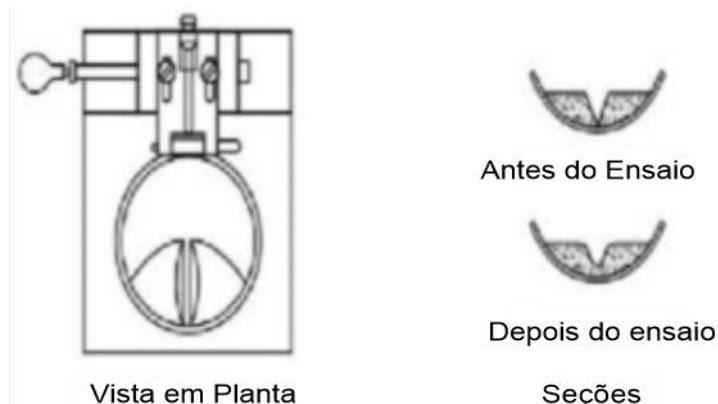
LP: Limite de Plasticidade (%)

4.2.4.2 Determinação do Limite de Liquidez

O ensaio de limite de liquidez foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 6459:2016, onde foi determinado o teor de umidade em que o solo passa a se comportar como um material líquido. A amostra após prévia preparação de acordo com a ABNT NBR 6457:2016 foi colocada em uma cápsula de porcelana onde foi adicionada água destilada em pequenas quantidades e amassadas com o auxílio da espátula a fim de obter uma massa homogênea e com consistência por 15 a 30 minutos, em seguida preencheu-se a concha do aparelho Casagrande com a amostra, dividindo a massa do solo em duas partes fazendo uma ranhura com cinzel (Figura 11) e aplicando os golpes da concha contra a base, deixando cair em queda livre, até que as bordas inferiores da ranhura se unissem, anotou-se a quantidade de golpes necessários, para assim obter o primeiro ponto com uma quantidade mínima de 35 golpes.

Uma pequena quantidade do material junto das bordas da ranhura que se uniram foi coletada para um recipiente adequado para a determinação de umidade; em seguida transferiu-se o material restante da concha para a cápsula de porcelana e adicionou-se água destilada ao material restante e homogeneizou-se por mais 3 minutos e realizou-se novo ensaio no aparelho casagrande afim de obter o segundo ponto, o procedimento repetiu-se até a obtenção de 5 pontos.

Figura 11 Esquema da amostra no Casagrande



Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6459: 2016

4.2.4.3 Determinação do Limite de Plasticidade

O ensaio de limite de plasticidade foi realizado de acordo com a norma ABNT NBR 7180:2016, onde foi determinado o teor de umidade em que o solo passa a se comportar como um material plástico.

A amostra preparada é colocada em uma cápsula de porcelana e misturada com uma pequena quantidade de água destilada, ao mesmo tempo amassando e revolvendo a amostra com o auxílio da espátula, formando uma pasta homogênea; após o tempo de 15 a 30 minutos para a homogeneização, retirar 10g dessa amostra e formar uma pequena “bola” que deve ser rolada sobre a placa de vidro (Figura 16) com pressão para lhe dar a forma de cilindro com de 3 mm de diâmetro (ABNT NBR 7180: 2016).

4.2.5 Caracterização Morfológica

As amostras de rejeito da mineração de caulim foram caracterizadas morfológicamente através da Microscopia Eletrônica de Varredura MEV, que foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará (IFPA) – Campus Belém.

4.2.6 Análise Granulométrica

O ensaio de granulometria foi realizado atendendo a ABNT NBR 7181: 2016, para determinar o tamanho das partículas do rejeito. No ensaio de granulometria, primeiramente foi determinada a massa seca ao ar da amostra preparada, em seguida foi levada para peneira de 2 mm para eliminação o material fino aderente; 70 g do material passante foi então pesado e levado para o processo de sedimentação e peneiramento fino, o material retido seguiu para o peneiramento grosso.

A amostra que passou na peneira de 2,0 mm foi levada para o processo de dispersão, onde foi colocada em repouso por 12 horas com 125 mL da solução defloculante de hexametafosfato de sódio de concentração 45,7g/cm³ para 1.000 cm³. O agente defloculante auxilia na dispersão do solo e impede que formem flocos. Após as 12 horas, submeter o material ao dispersor por 15 minutos e transferi-lo para a proveta de 1000 mL por 24 horas, seguindo para a etapa de peneiramento fino, onde foi levada à estufa sob uma temperatura de 105°C a 110°C até a constância da massa, em seguida passou-se a amostra nas peneiras de 1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15 e 0, 075 mm anotando as massas retidas de cada peneira.

De acordo com a norma ABNT NBR 7181:2016, o material retido na peneira de 2,0 mm deveria ser levado para o peneiramento grosso, onde seria passado nas peneiras de 50, 38, 25, 19, 9,5 e 4,8 mm, anotando as massas retidas acumuladas em cada peneira, no entanto não houve material retido na peneira de 2,0 mm, logo o peneiramento grosso não foi realizado.

4.2.7 Determinação dos traços das composições do tijolo de solo-cimento

Para a fabricação de tijolos de solo-cimento (ABNT NBR 10833:2012) usa-se basicamente uma mistura constituída de solo, cimento e água, devidamente calculada. A reunião da quantidade de material necessária que constituirá o material, ou seja, a mistura que irá compor a fabricação do tijolo é chamada de traço (SILVA et al, 2018). De acordo com Funtac (1999), a preparação e escolha do traço depende do material utilizado, dando exemplos de misturas 1:10, 1:12 e 1:14, sendo que a cada uma parte de cimento têm-se 10 de solo no traço 1:10.

No trabalho de Anjos e Neves (2011) foi utilizado um traço 1:10 onde o rejeito de caulim, foi adicionado à mistura de solo-cal, em percentuais de 10% a 40%, para

a fabricação de blocos solo-cal; em seu trabalho, Ribeiro (2013) utilizou um traço de 1:8, sendo a mistura composta de resíduo de rocha ornamental em substituição ao solo arenoso nas seguintes proporções 10%, 20%, 30% e 40 %, para a produção de tijolos de solo-cimento. No presente trabalho foi utilizado o traço de referência que Ribeiro (2013) utilizou em seu trabalho 1:8, sendo avaliada a substituição do solo arenoso pelo rejeito de caulim, nas proporções: 0, 10, 20, 30 e 40% conforme Tabela 2.

Tabela 2 - Composição dos traços em partes 1:8

Traço	Composição Solo+rejeito	Cimento	Solo	Rejeito
TR0	0% rejeito	1,0	8,0	0,0
TR1	10% rejeito	1,0	7,2	0,8
TR2	20% rejeito	1,0	6,4	1,6
TR3	30% rejeito	1,0	5,6	2,4
TR4	40% rejeito	1,0	4,8	3,2

Fonte: Próprio autor (2021).

Antes de misturar, todos os componentes passaram pela peneira de 200 mm para desfazer pequenos torrões presentes nos materiais, após tal processo adicionou-se aos poucos o cimento, solo arenoso e o rejeito de caulim sendo realizada uma rigorosa homogeneização manual até que esta mistura adquirisse uma coloração uniforme, em seguida sendo adicionado gradualmente água potável e realizando nova homogeneização, até que a mistura adquiriu um aspecto de “farofa”. Tal mistura foi levada até a prensa manual onde a prensagem foi realizada.

Para este trabalho foram produzidos tijolos de solo-cimento do tipo vazado, com as dimensões de 120 x 250 x 65 mm. Os elementos fabricados foram estocados em uma área para cura por 28 dias e mantidos úmidos por um tempo igual a 07 dias, para que não haja desidratação e para que ocorresse o endurecimento do tijolo (ABNT NBR 10833:2012).

4.2.8 Fabricação dos Tijolos de Solo-Cimento

Os corpos de prova foram fabricados nas dimensões do tijolo de solo-cimento, de acordo com os requisitos da norma ABNT NBR 8491:2012, os mesmo foram

fabricados através de prensagem manual (Figura 12, 13, 14 e 15) e seguindo as orientações da norma ABNT NBR 10833:2013.

Figura 12 – Caixa de prensagem dos tijolos de solo-cimento



Fonte: Autor Próprio

Figura 13 – Mistura sendo colocada na caixa de prensagem



Fonte: Autor Próprio.

Figura 14 – Tijolos após prensagem



Fonte: Autor Próprio.

Figura 15 – Tijolo sendo desenformado



Fonte: Autor Próprio.

A Figura 12 mostra a prensa manual onde os corpos de prova foram prensados; nas Figuras 13, 14 e 15 podem ser observados os corpos de prova

sendo preparados e sendo estocados para o processo de cura, onde ocorreu o endurecimento do tijolo de solo cimento em um período de 28 dias, sendo que os 7 primeiros dias foram mantidos úmidos, de acordo com a norma ABNT NBR 10833.

Após o tempo de cura de 28 dias, os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de análise dimensional, resistência a compressão e absorção de água, sendo os requisitos necessários que a norma ABNT NBR 8491 solicita que para que os tijolos sejam aceitos. Ao todo foram fabricados 5 tijolos por traço, totalizando 25 tijolos.

4.6 ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS NOS CORPOS DE PROVA

Os corpos-de-prova estando devidamente curados foram submetidos aos seguintes ensaios:

- 1 Análise Dimensional (ABNT NBR 8492:2012);
- 2 Resistência a Compressão (ABNT NBR 8492:2012);
- 3 Absorção de Água (ABNT NBR 8492:2012);

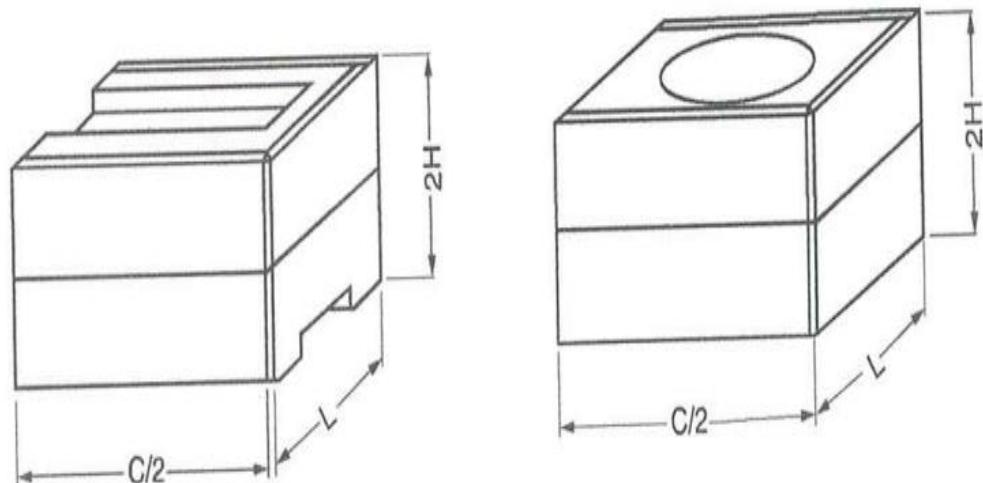
4.6.1 Análise Dimensional

A análise aconteceu de acordo com a norma ABNT NBR 8492:2012, onde foi utilizado um paquímetro com uma resolução de no mínimo 0,5 mm e que continha um comprimento adequado à dimensão que o tijolo apresentava.

4.6.2 Resistência dos corpos de prova

O ensaio de resistência à compressão foi realizado no laboratório de ensaios mecânicos do IFPA/Campus Bélem, os corpos de prova foram cortados ao meio e colocado sobrepostos, com suas superfícies cortadas invertidas, sendo ligadas por uma fina camada de pasta de cimento Portland como na Figura 16, onde pode-se ver um esquema de preparação dos corpos de prova dos tijolos maciço (a esquerda) e vazado (a direita).

Figura 16 – Esquema da preparação dos corpos de prova para o ensaio de compressão



Fonte: ABNT NBR 8492:2012

Na Figura 17 pode-se visualizar o corpo de prova preparado para o ensaio de compressão, na figura 18 tem-se a prensa utilizada no ensaio de compressão.

Figura 17 – Corpo de prova preparado para o ensaio de compressão



Fonte: Autor Próprio.

Figura 18 – Prensa para o ensaio de compressão



Fonte: Autor Próprio.

Após o endurecimento do corpo de prova preparado, o mesmo foi submetido ao ensaio na prensa hidráulica para a realização do ensaio de resistência à compressão, com uma aplicação de carga uniforme de 500 N/S (50 kgf/s), sendo elevada gradativamente, até que ocorresse a ruptura do corpo de prova (Figuras 19 e 20). O ensaio foi realizado em triplicata para cada traço.

Figura 19 – Corpo de prova sendo submetido ao ensaio de compressão



Fonte: Autor Próprio.

Figura 20 – Corpo de prova rompido



Fonte: Autor Próprio.

Os valores individuais da resistência à compressão são expressos em MPa através da seguinte fórmula:

$$ft = \frac{F}{S} \quad (1.2)$$

onde:

ft: resistência à compressão simples (MPa);

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

S: área de aplicação da carga (mm^2).

4.6.3 Absorção de água

O ensaio foi realizado de acordo com a ABNT NBR 8492:2012, onde os tijolos foram secos em estufa, na temperatura de 105 °C, até sua constância de massa, sendo em seguida pesados. Em seguida, os corpos de prova foram imersos em água por um período de 24 horas (Figura 21), sendo retirados e enxugados superficialmente com um pano para serem pesados novamente. O ensaio foi realizado em duplicata para cada traço.

Figura 21 – Corpos de prova imersos em água



Fonte: Autor próprio.

Onde os valores individuais de absorção de água são obtidos em unidade de porcentagem, através da seguinte expressão:

$$A = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100 \quad (1.3)$$

Onde:

A: absorção de água (%)

m_1 : massa do corpo seco (g)

m_2 : massa do corpo úmido (g)

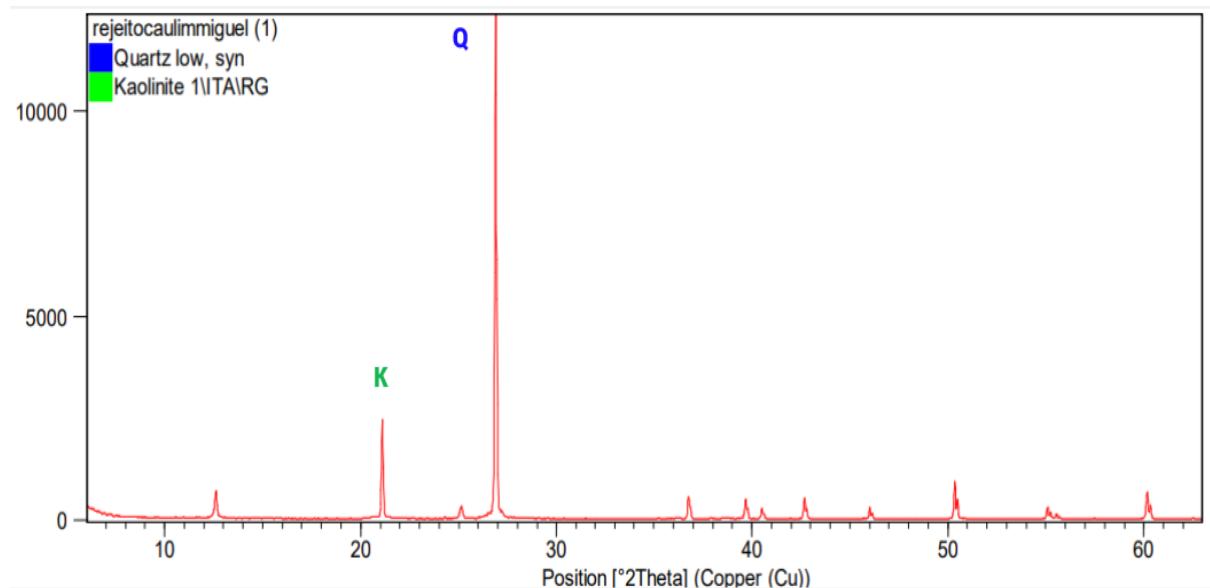
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO

5.1.1 Análise Mineralógica

A análise da caracterização mineralógica, realizada através da Difração de Raios-X, no rejeito da mineração de caulim pode ser visualizada na Figura 22.

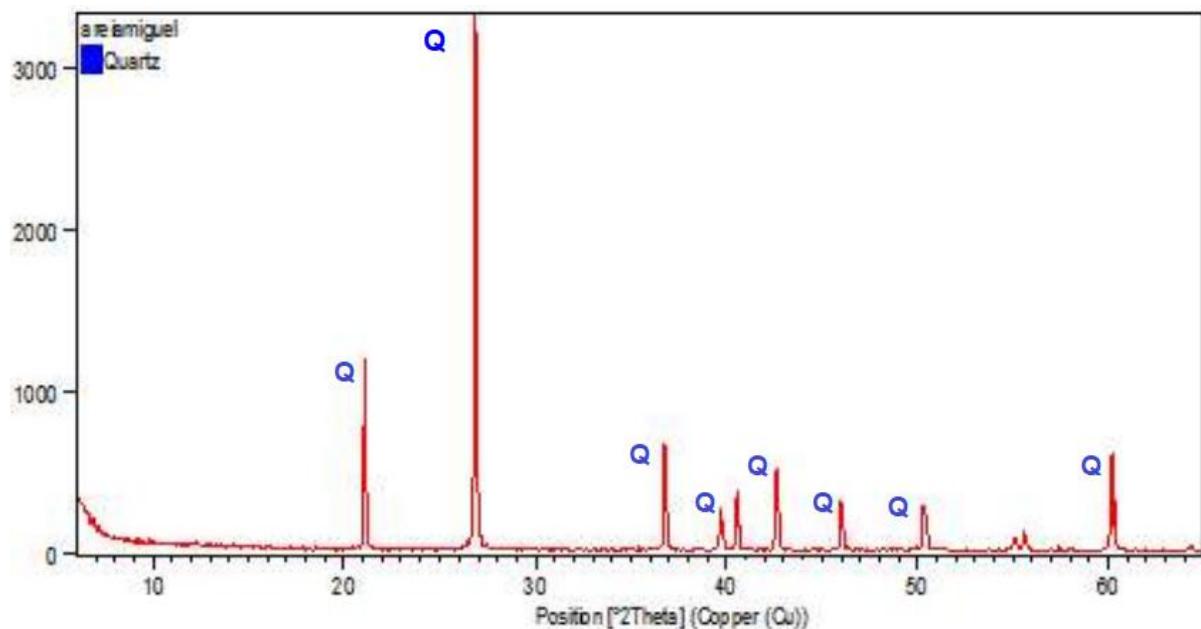
Figura 22 – Resultado da análise mineralógica de Difração de Raios-X do rejeito de caulim



Fonte: Autor Próprio.

Através da análise da Figura 22, pode-se identificar no difratograma um pico principal referente a fase quartzo, seguida da fase do mineral caulinita. Esse resultado era esperado, pois o mineral de quartzo encontra-se geralmente associado à caulinita na natureza e por se tratar de um rejeito oriundo da etapa de fracionamento granulométrico, onde ocorre a separação dos dois minerais citados e é de se esperar que ainda seja possível que o rejeito apresente uma certa quantidade de caulim. A Figura 23 apresenta o resultado da difração de Raios-X da areia.

Figura 23 – Resultado da análise mineralógica de Difração de Raios-X do solo arenoso



Fonte: Autor Próprio.

Através da Figura do gráfico 23, pode-se verificar no difratograma picos que indicam que o SiO₂ presente na amostra encontra-se na fase mineralógica do quartzo.

5.1.2 Análise Química

A composição química do rejeito da mineração de caulim e do solo arenoso, realizada por Fluorescência de Raios-X, pode ser visualizado na Tabela 3. Verifica-se que o SiO₂ é o componente de teor majoritário tanto no rejeito de caulim, como no solo arenoso, ficando acima de 80% na amostra de rejeito e acima de 95% no solo arenoso; os componentes minoritários Al₂O₃ e o TiO₂, apresentaram percentuais em menores proporções, compondo 15% no rejeito e 1,2% respectivamente no rejeito, no solo arenoso, esses componentes apresentaram teores de 1,8% (Al₂O₃) e 0,4% (TiO₂); As demais substâncias presentes na composição são SO₃ e Fe₂O₃, apresentando teores inferiores a 1% em ambas as amostras.

Tabela 3 – Resultado da análise química por Fluorescência de Raios-X do Rejeito de Caulim e do solo arenoso

Parâmetros	Rejeito de Caulim (%)	Solo Arenoso (%)
SiO ₂	82,96	97,07
Al ₂ O ₃	15,11	1,845
TiO ₂	1,21	0,388
SO ₃	0,204	0,308
Fe ₂ O ₃	0,42	0,162

Fonte: Autor Próprio.

O alto percentual de Al₂O₃ e SiO₂ no rejeito justifica-se por se tratar de um rejeito coletado após a etapa de centrifugação, logo espera-se que ainda contenha caulinita no material, por se tratar de um aluminossilicato, gerando essa grande quantidade desses componentes. Os resultados obtidos foram semelhantes com os que LEANDRO et al (2017) conseguiram em seus estudos sobre a caracterização de resíduo de caulim para uso na formulação de cimento portland, verificou-se a presença das mesmas substâncias, sendo SiO₂ e Al₂O₃ os componentes com os maiores percentuais.

5.1.3 Limite de Liquidez e Plasticidades

Os resultados referentes à determinação do limite de liquidez, plasticidade a ao Índice de Plasticidade referentes ao rejeito da mineração de caulim encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 - Resultado da análise física de Limites de Consistência de Atterberg (%)

Índice de Plasticidade	Limite de Liquidez (LL)	Limite de Plasticidade (LP)
7,47	24	16,53

Fonte: Próprio autor (2021).

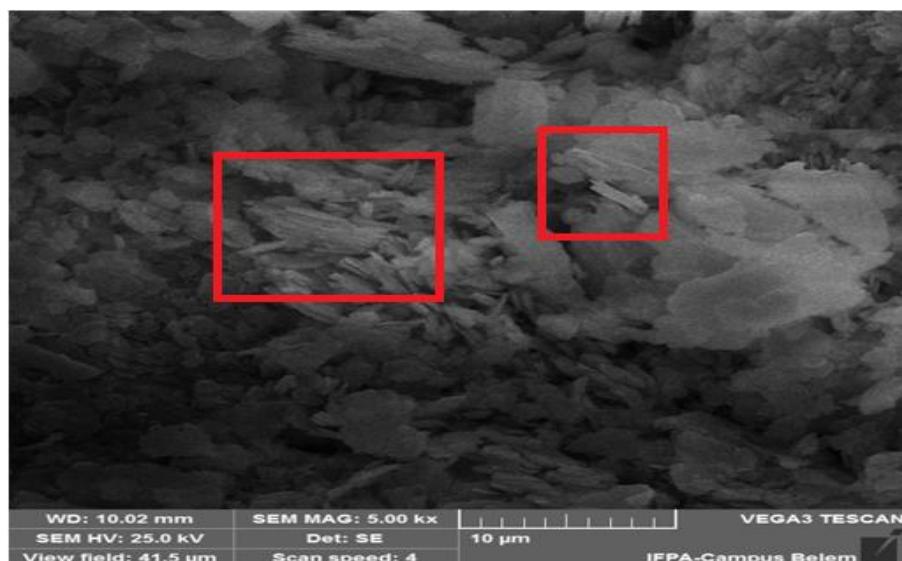
Observa-se que os resultados obtidos encontram-se dentro dos padrões que são colocados por Funtac (1999), que expressam que os solos mais adequados para a fabricação de tijolos de solo-cimento precisam apresentar as seguintes características: limite de liquidez abaixo de 45% e índice de plasticidade menor que 12%. Funtac ainda ressalta que os solos arenosos estabilizam-se com poucas quantidades de cimento, sendo que a presença da argila ajuda na conformação e no

seu manuseio após a sua prensagem, dando coesão a mistura para a formação do tijolo.

5.1.4 Análise Morfológica

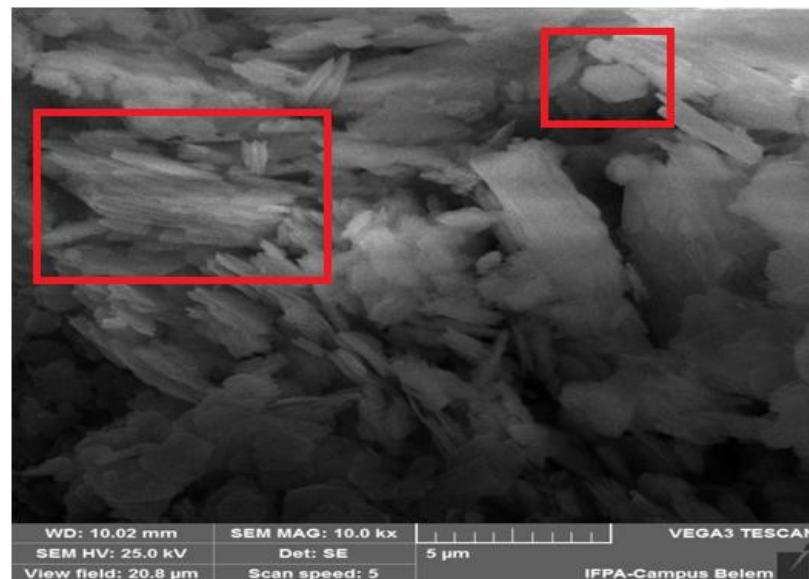
Os resultados da análise morfológica para a microscopia eletrônica de varredura podem ser visualizados nas Figuras 24 e 25. Através das imagens pode-se verificar que os grãos da caulinita encontram-se formando aglomerados com feições pseudohexagonais um tanto disformes e em camadas empilhadas, estando de acordo com CAGLAR (2013), de ser um argilomineral que se distribui em camadas empilhadas.

Figura 24 – Grãos de caulinita no Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Próprio autor.

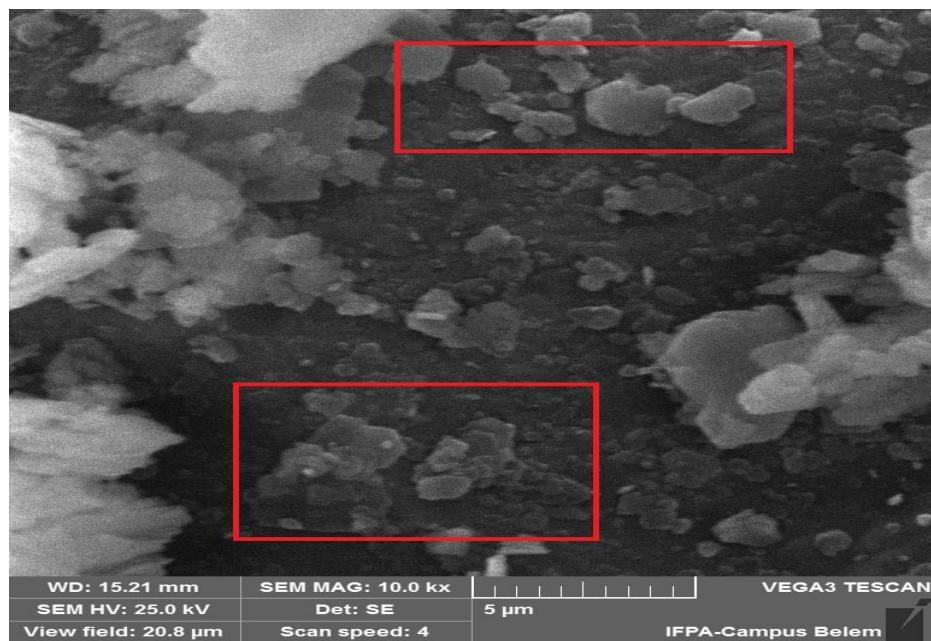
Figura 25 – Grãos de caulinita no Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Próprio autor.

Na figura 26 pode-se visualizar grãos que apresentam uma morfologia mais arredondada e angular, característico do mineral quartzo, semelhante ao encontrado por SAAD e colaboradores (2019), no entanto a qualidade da imagem gerada pelo MEV não foi satisfatória para confirmar se trata-se de fato quartzo.

Figura 26 – Grãos de caulinita no Microscópio Eletrônico de Varredura



Fonte: Próprio autor.

5.1.5 Análise Granulométrica

Os resultados da análise granulométrica da amostra de rejeito da mineração de caulim podem ser vistos na tabela 5, como não houve material retido na peneira de 2 mm, o peneiramento grosso não foi realizado.

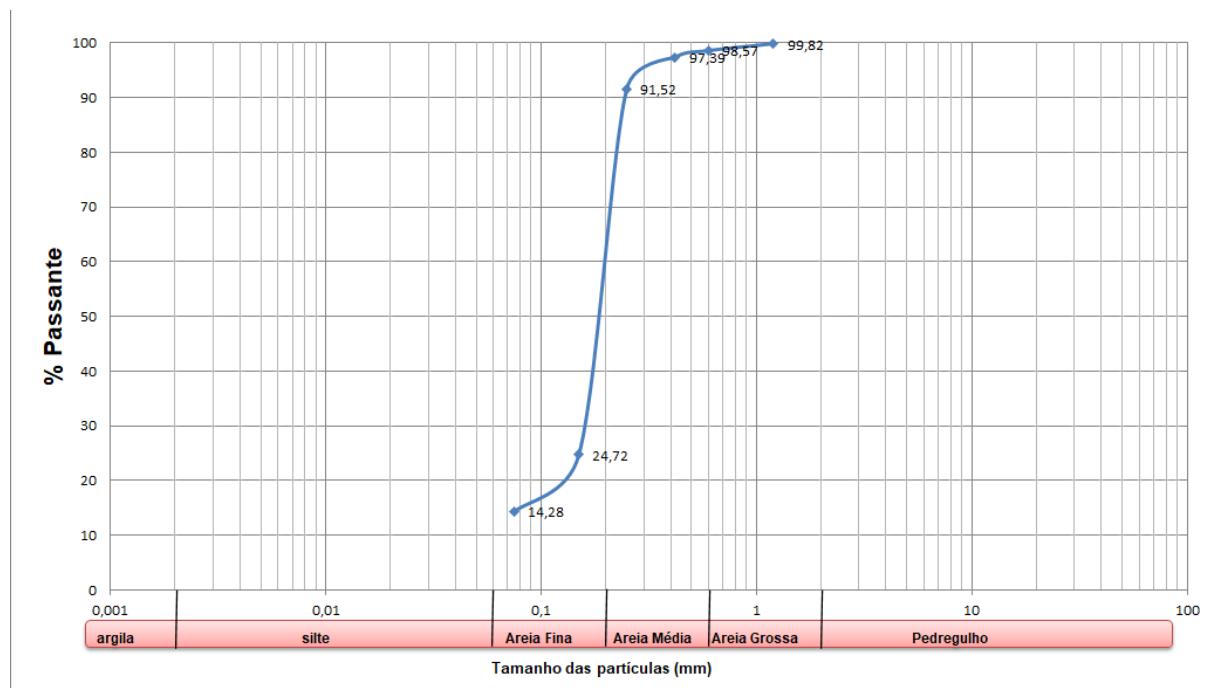
Tabela 5 - Resultado da Análise Granulométrica do rejeito da mineração de caulim

Peneira (#)	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retido acumulada	% material que passa
16	1,2	0,22	0,18	0,18	99,82
30	0,6	1,5	1,25	1,43	98,57
40	0,42	1,41	1,18	2,61	97,39
60	0,25	7,04	5,87	8,48	91,52
100	0,15	80,16	66,8	75,28	24,72
200	0,075	12,53	10,44	85,72	14,28
Fundo	-	17,14	14,28	100	0,00
Total: 120					

Fonte: Autor Próprio (2022).

O material passante da amostra foi acima de 90% nas aberturas 1,2, 0,6, 0,42 e 0,25; diminuindo consideravelmente na peneira 0,15, onde passou um pouco mais de 24% e 14,28% na peneira de abertura 0,075 mm. A curva granulométrica gerada pode ser visualizada na Figura 27.

Figura 27 – Curva Granulométrica do rejeito da mineração de caulim



Fonte: Próprio Autor (2022).

Através da curva granulométrica, pôde-se encontrar que o diâmetro majoritário dos grãos (75,28%) da amostra de rejeito de caulim que ficaram retidos na peneira de malha #100, junto do material que ficou retido na peneira de malha #200, apresentando 85,72% dos grãos de areia e 14,28% de material passante nesta última peneira, se tratando de silte e argila, podendo classificar o rejeito como sendo constituído predominantemente de um solo de areia fina, com uma pequena porção de silte e argila, de acordo com a classificação das partículas contida na norma ABNT NBR 6502:1995 (Tabela 6).

Tabela 6– Classificação das partículas ABNT NBR 6502:1995

Solo	Intervalo (mm)
Pedregulho	2,0-60
Areia grossa	0,60-2,0
Areia média	0,20-0,60
Areia fina	0,06-0,2
Silte	0,002-0,06
Argila	Menor que 0,002

Fonte: Adaptado de ABNT NBR 6502:1995

O resultado da análise granulométrica na areia pode ser visto na tabela 7.

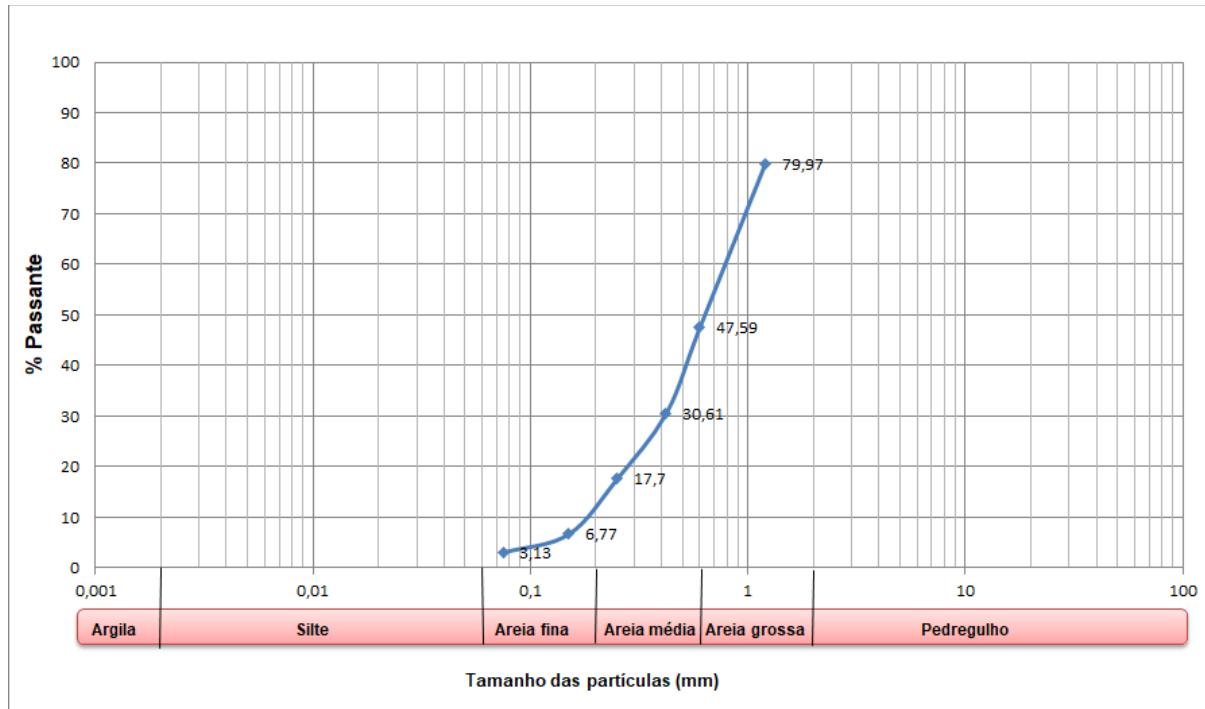
Tabela 7 - Resultado da Análise Granulométrica da areia

Peneira (#)	Abertura (mm)	Massa retida (g)	% Retida	% Retido acumulada	% material que passa
16	1,2	24,03	20,03	20,03	79,97
30	0,6	38,86	32,38	52,41	47,59
40	0,42	20,38	16,98	69,39	30,61
60	0,25	15,49	12,91	82,30	17,70
100	0,15	13,12	10,93	93,23	6,77
200	0,075	4,37	3,64	96,87	3,13
Fundo	-	3,75	3,13	100	0,00
Total 120					

Fonte: Autor Próprio (2022).

Através dos resultados da tabela 7, pode-se ver que cerca de 20% do material foi retido na peneira de abertura de 1,2 mm e um pouco mais de 30% na peneira de 0,6 mm, seguido das peneiras de aberturas 0,42 mm, 0,25 e 0,15 que retiveram respectivamente 16%, 12% e 10% dos grãos de areia, finalmente chegando à peneira de 0,075 mm, onde 3,64% foi retido pela peneira e 3,14% de grãos que passaram por ela até o fundo. A curva granulométrica pode ser vista na figura 37.

Figura 28 – Curva Granulométrica do solo arenoso



Fonte: Autor próprio (2022).

Através da curva granulométrica gerada, pode-se verificar que cerca de 20% do diâmetro dos grãos são compostos de areia grossa, mais 60% é composto de areia média, 13% de areia fina e um percentual de 3% de material de diâmetro inferior à peneira de abertura 0,075mm. Classificando assim o solo arenoso analisado como constituído predominantemente de areia média, com um percentual inferior de areia grossa.

5.2 RESULTADOS DOS ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS NOS CORPOS DE PROVA

5.2.1 Análise dimensional

Os resultados individuais referente a cada um dos traços fabricados pode ser visualizada na tabela 8.

Tabela 8 – Resultado da análise dimensional nos corpos de prova

	LARGURA (mm)	COMPRIMENTO (mm)	ALTURA (mm)
TR0-1	120,5	250,3	65,1
TR0-2	120,7	250,5	65,3
TR0-3	120,5	250,5	65,1
TR1-1	120,5	250,3	65,0
TR1-2	120,6	250,1	65,4
TR1-3	120,4	250,5	65,2
TR2-1	120,6	250,6	65,0
TR2-2	120,8	250,5	65,4
TR2-3	120,5	250,3	65,1
TR3-1	120,4	250,4	65,0
TR3-2	120,8	250,3	65,1
TR3-3	120,6	250,5	65,3
TR4-1	120,5	250,6	65,0
TR4-2	120,6	250,5	65,2
TR4-3	120,8	250,5	65,3

Fonte: Autor Próprio.

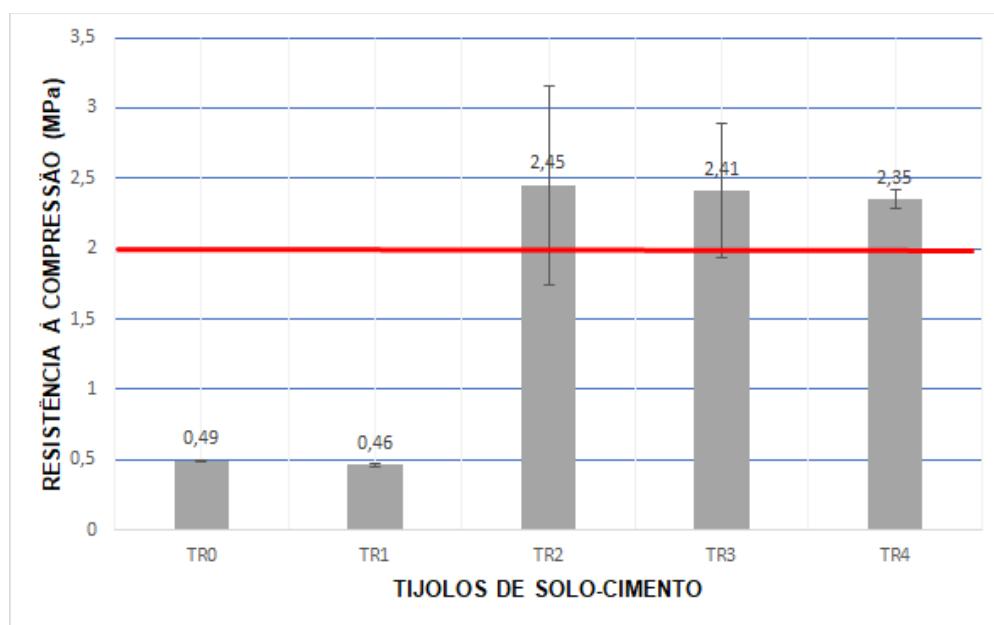
A norma ABNT NBR 8491 descreve as dimensões nominais exigidas e que elas podem ser diferentes das apresentadas, desde que o corpo de prova apresente a medida da altura, inferior ao da largura (ABNT NBR 8491:2012, 4.2.2), como foi mencionado anteriormente, o tijolo de solo cimento deste trabalho utilizou as dimensões 120x250x65 mm (largura, comprimento e altura respectivamente) como padrão.

Análise das dimensões dos tijolos precisa satisfazer as tolerâncias das dimensões nominais com uma diferença de 1,0 mm, para mais ou para menos; através dos resultados obtidos e apresentados na tabela 08, obteve-se os seguintes dados: a média dos valores da largura que os tijolos apresentaram foi de 120,6 mL com um desvio padrão de 0,13; a média do comprimento dos tijolos foi de 250,4 mL com um desvio padrão de 0,14; e a média da altura dos tijolos que foi 65,2 mL e desvio padrão de 0,14, sendo assim, todos os corpos de prova conseguiram satisfazer o requisito exigido pela norma.

5.2.2 Análise de resistência à compressão

Os valores médios dos resultados do ensaio de resistência obtidos nos corpos de prova podem ser vistos na figura 38.

Figura 29 – Média dos resultados de Resistência à Compressão



Fonte: Autor Próprio.

O requisito presente na norma ABNT NBR 8491 afirma que a amostra precisa apresentar valor individual de resistência à compressão igual ou superior à 1,7 MPa e valor médio igual ou superior à 2,0 MPa para estar dentro da normalidade. Os resultados presentes na figura acima mostram que os corpos de prova dos traços TR0 e TR1 foram recusados no ensaio, enquanto que os traços TR2, TR3 e TR4 apresentaram resultados satisfatórios.

Analizando os valores individuais presentes na tabela 9, verifica-se que entre os traços TR2, TR3 e TR4 não houve diferenças significativas, percebe-se um certo aumento da resistência em comparação do traço TR2 para o TR3; ao verificar os valores do traço TR4, verifica-se que este apresentou valores de resistência a compressão menores em comparação ao traço TR3, mas são um pouco acima do traço TR2. Os traços TR0 e TR1 apresentaram resultados bem aproximados e ambos foram recusados no ensaio.

Tabela 9 – Valores individuais de resistência à compressão

	Resistência à compressão (MPa)			
	Corpo de prova 01	Corpo de prova 02	Corpo de prova 03	Média
TR0	0,48	0,49	0,49	0,49
TR1	0,47	0,46	0,45	0,46
TR2	2,29	1,83	3,22	2,45
TR3	2,42	2,89	1,93	2,41
TR4	2,30	2,33	2,43	2,35

Fonte: Autor Próprio (2022).

A diferença entre os traços era a quantidade de rejeito presente em sua mistura, o corpo de prova do TR0 apresentava quantidade igual a zero de rejeito de mineração de caulim, sendo utilizado somente a areia na composição da mistura junto ao cimento e a água.

O rejeito de caulim foi caracterizado como predominantemente areia fina, mas contém uma pequena quantidade de solo siltoso/argiloso devido à presença de caulinita, a substituição de 10% do solo arenoso, por rejeito de caulim na mistura preparada para o traço TR1 não obteve os resultados que a norma ABNT NBR 8491:2012 exige, mas os traços TR2, TR3 e TR4 conseguiram alcançar os valores exigidos pela norma.

De acordo com a Segantini (2000, apud MACHADO e ARAÚJO, 2014), os solos mais indicados para a confecção de tijolos solo-cimento são os que possuem características arenosas, com uma faixa de silte/argila entre 10% e 20%; provavelmente o aumento da quantidade do rejeito proporcionou a quantidade de solo siltoso/argiloso necessária, que pudesse preencher os espaços vazios deixados pelos grãos maiores de areia, dando a coesão necessária ao tijolo na compactação e prensagem.

5.2.3 Análise de absorção de água

O resultado da análise de absorção de água pode ser visualizado na tabela 10.

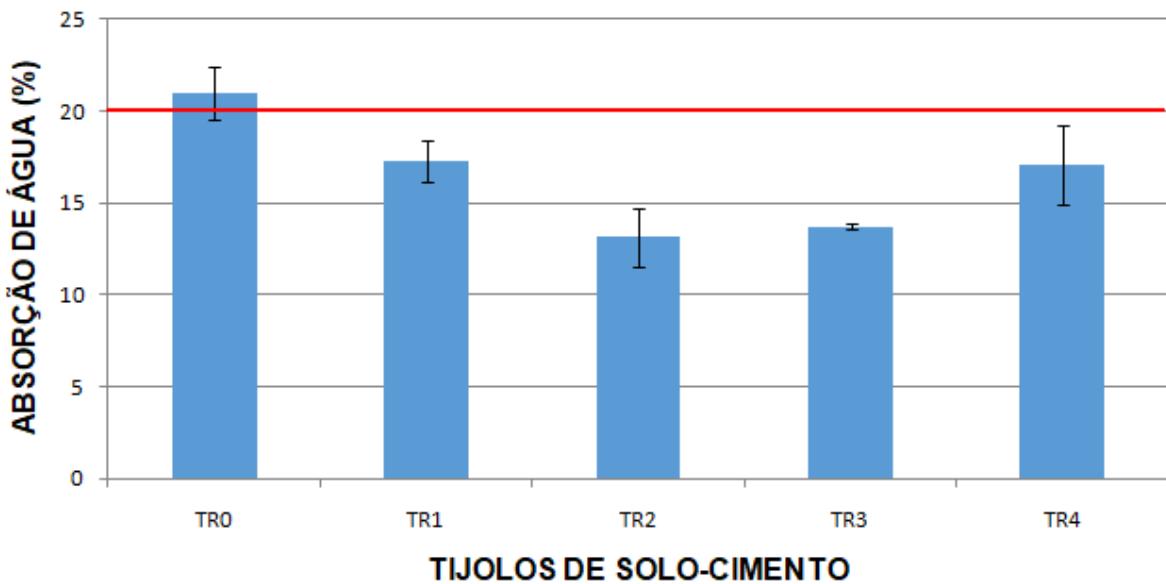
Tabela 10 – Resultado da Análise de Absorção de água nos corpos de prova

Traço	Peso Seco (g)	Peso Úmido (g)	Absorção (%)
TR0-1	2.685	3.275	21,97
TR0-2	2.805	3.340	19,07
TR1-1	2.910	3.435	18,04
TR1-2	2.855	3.325	16,46
TR2-1	3.010	3.440	14,28
TR2-2	3.080	3.450	12,01
TR3-1	3.015	3.425	13,59
TR3-2	3.070	3.495	13,84
TR4-1	2.985	3.450	15,58
TR4-2	2.905	3.445	18,59

Fonte: Autor Próprio (2022).

A ABNT NBR 8491:2012 apresenta como requisito, que os valores individuais do ensaio de absorção de água sejam no máximo 22% e a média dos valores não seja superior a 20%, analisando os valores individuais da tabela 9, observa-se que as amostras do traço TR0 apresentaram valores próximos a 22%, aproximando-se do limite permitido pela ABNT NBR 8491:2012, os traços TR1 e TR4 apresentaram resultados entre 15% e 18,5%, enquanto que os traços TR2 e TR4 apresentaram os melhores resultados, abaixo de 14%. Quanto à absorção média, TR0 ficou acima de 20%, sendo recusado para o ensaio; os demais traços obtiveram resultados satisfatórios, sendo TR2 e TR3 os melhores resultados, como pode ser visto na figura xx.

Figura 30 – Média dos resultados de Absorção de Água



Fonte: Autor próprio.

Analizando a figura, a média dos resultados dos tijolos dos traços TR2 e TR3 apresentaram resultados mais afastados do máximo (20%), sendo destacado pela linha vermelha, o desvio padrão do traço TR3 é inferior ao do traço TR2, logo possui menos variações em seus resultados.

6 CONCLUSÃO

Através dos resultados obtidos na caracterização do rejeito de mineração de caulim, verificou-se que é constituído predominantemente de SiO_2 e Al_2O_3 , a análise química da fluorescência de Raios-X confirmou a presença dessas substâncias junto com a análise morfológica da microscopia eletrônica de varredura, através da análise mineralógica, identificou-se a fase predominante do mineral de quartzo, seguido da caulinita.

As análises de limite de liquidez, limite de plasticidade e o índice de Atterberg também apresentaram resultados satisfatórios de acordo com a literatura, para a confecção de tijolos de solo-cimento. Através da análise granulométrica, pôde-se observar que os grãos da amostra de rejeito da mineração de caulim podem ser classificados como um solo predominante de areia fina, com porções de silte.

Através da análise química no solo arenoso, verificou-se a substância SiO_2 como componente majoritário presente na amostra e o mineral quartzo como fase mineralógica. A análise granulométrica realizada no solo arenoso classificou que seus grãos são constituídos predominantemente por areia média, seguido de uma porção de areia grossa.

Observando os resultados individuais e as médias que foram obtidos através dos ensaios de resistência à compressão e absorção de água, os traços TR2, TR3 e TR4 apresentaram resultados satisfatórios, de acordo com a norma ABNT NBR 8492:2012. Os resultados entre os traços não apresentaram diferenças significativas para o ensaio de resistência à compressão, mas para o de absorção de água. os traços TR2 e TR3 apresentaram resultados melhores, sendo assim, o traço mais indicado para a fabricação dos tijolos de solo-cimento é o TR3, pois possibilita a utilização de mais rejeito da mineração de caulim no processo, substituindo à areia em 30%, dando um destino alternativo para o rejeito da mineração de caulim.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR 6502:1995 Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995.

ABNT NBR 6457:2016 Versão Corrigida 2016 Amostras de Solo – Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização . Rio de Janeiro, 2016.

ABNT NBR 7180: 2016 Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT NBR 7181: 2016 Versão Corrigida 2018 Solo – Análise Granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.

ABNT NBR 8491: 2012 Tijolo de solo-cimento - Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT NBR 8492: 2012 Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água — Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT NBR 10833: 2012 fabricação de tijolo e bloco de solo-cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica. Rio de Janeiro, 2012.

ABNT NBR 10834: 2012 Bloco de solo-cimento sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, RJ, 2012.

ABNT NBR 10836: 2013 Bloco vazado de solo-cimento sem função estrutural – Análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água. Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, 2013. 2p.

ABNT NBR 16697: 2018. Cimento portland - Requisitos. Rio de Janeiro , 2018.

ALBERS, A. P. F.; MELCHIADES, F. G.; MACHADO, R.; BALDO, J. B.; BOSCHI, A. O. **Um Método Simples de Caracterização de Argilominerais por Difração de raios X.** Cerâmica, v. 48, n. 305, p. 34-37, Mar. 2002 .

AMIN, SH. K.; EL-SHERBINY, S. A.; ABO EL-MAGD, A. A. M.; BELAL, A.; ABADIR, M. F. **FABRICATION OF GEOPOLYMER BRICKS USING CERAMIC DUST WASTE**. Construction and Building Materials, Volume 157, 2017, Pages 610-620.

ANJOS, C. M.; NEVES, G. A. **Utilização do resíduo de caulim para a produção de blocos solo-cal**. Revista Eletrônica de Materiais e Processos, v.6.2 (2011) 91-96.

ARAÚJO, A. C. S.; COSTA, M. S. B. da; DANTAS, V. da S. P. **Aproveitamento do Rejeito de Caulim para Fabricação de Cerâmica Vermelha no Seridó Potiguar**. Anais I CONIMAS e III CONIDIS. Campina Grande: Realize Editora, 2019.

AZEVEDO, G. H. de; VITAL, A. de F. M. **Aproveitamento do Rejeito das Indústrias de Beneficiamento de Caulim para a Produção de Tinta Ecológica à Base de Terra**. *Tecnol. Metal. Mater. Min.*, vol. 15,n3, p.242-247, 2018.

Bates, R L, and Jackson, J A. **Glossary of geology**. United States: N. p., 1987. Web.

BERTOLINO, L. C.; TOREM, M. L.; SCORZELLI, R. N.; ROSSI, A. M. **CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA E BENEFICIAMENTO DO CAULIM DE PRADO (BA). HOLOS**, [S.I.], v. 5, p. 83-92, dez. 2012.

CABRELON, M. D.; BOSCHI, A. O. **Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) Acoplada a Espectroscopia por Dispersão de Elétrons (EDS): Uma Ferramenta Poderosa Para a Eliminação Efetiva de Defeitos em Produtos Cerâmicos**. Cerâmica Industrial, São Paulo, vol. 10 (5/6), Setembro/Dezembro, 2005.

CAMPOS, A. P.; FARIAS, V. M. ANM - **Sumário Mineral 2017**, Caulim. Vol 37 ISSN 0101-2053.

CARTILHA PRODUÇÃO DE TIJOLOS DE SOLO-CIMENTO. Instituto Educacional Piracicabano da Igreja Metodista – IEP. Editora Unimep. Piracicaba, 2016.

COSTA, J. H. B.; BERGERMAN, M. G. PANORAMA DOS ESTUDOS DE APROVEITAMENTO DE REJEITOS DE MINERAÇÃO DO ESTADO DO PARÁ DE 2010 A 2020. XXIX Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia extrativa. Armação dos Búzios-RJ, 25 a 28 de Setembro de 2022.

DILL, H. G. Kaolin: Soil, rock and ore From the mineral to the magmatic, sedimentary and metamorphic environments. Earth-Science Reviews 161 (2016) 16-129.

FARIAS, B. M. et al. Produção de matrizes adsorventes a partir de Zeólita A e Sodálita. Braz. J. of Develop., Curitiba, v. 6, n. 9, p. 73464-73478 sep. 2020.

FERREIRA, L. da S. APLICAÇÃO DE CAULIM COMO LIGANTE EM MOLDES DE AREAIS A VERDE DE FUNDIÇÃO. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2020.

GANZALA, G. G. A Industrialização, Impactos Ambientais e a Necessidade de Desenvolvimento de Políticas Ambientais Sustentáveis no Século XXI. Academia do Curso de Bacharelado em Relações Internacionais, Faculdade UNINTER, 2018.

IMERYS. Minerals and more, 2021. Disponível em: <https://www.imerys.com/pt/node/3981> Acesso 07 de jul. de 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. Informações e análises da economia mineral brasileira. Dez. 2012.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO – IBRAM. Informações sobre a Economia Mineral Brasileira 2020 – Ano Base 2019. 2020.

IGNACIO, O. T. M.; QUERO, V. G. J.; PAZ, J. G.; GARCÍA, P. M. RECYCLING UNTREATED SUGARCANE BAGASSE ASH AND INDUSTRIAL WASTES FOR

THE PREPARATION OF RESISTANT, LIGHTWEIGHT AND ECOLOGICAL FIRED BRICKS. ConstructionandBuildingMaterials, Volume 234, 20 February 2020, 117314.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos Resíduos da Atividade de Mineração de Substâncias Não Energéticas.** Brasília: Ipea, 2012.

LEANDRO, A. P.; VIERA, E. V.; LIMA, L. G.; ATAÍDE, T. N. **ESTUDO DO RESÍDUO DE CAULIM PEGMÁTICO USADO COMO INGREDIENTE NA FORMULAÇÃO DE CIMENTO PORTLAND.** HOLOS, [S.I.], v. 6, p. 224-232, dez. 2017.

LEITE, J. Y. P.; SOUZA, L. L. **Comportamento do Rejeito de Caulim em Concentrador Centrifugo.** II Simpósio de Minerais Industriais do Nordeste, Campina Grande/PB - 17 a 20/11/2010.

LEMOS, I. B.; REIS, M. J.; REIS, F. M. D.; SANJULIÃO, L. K. A. F.; RODRIGUES, T. V. **Confecção de Tijolos Ecológicos Solo-Cimento Incorporados com Rejeitos de Minerações de Quartzito e Rocha Fosfática.** IX Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, Ponta Grossa, PR, Brasil, 04 a 06 de dezembro de 2019.

LIMA, M. S. **Utilização do Resíduo de Caulim para uso em Blocos de Concreto sem FunçãoEstrutural.** 2005. 79f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental)- Universidade Federal de Campina Grande. Campina Grande, PB, 2005.

LUZ, A. B.(Ed.); LINS, F. A. F.(Ed). **Rochas & minerais Industriais: usos e especificações.** 2.Ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2008. 990p.

MACHADO, A. O.; ARAÚJO, J. A. de. **Avaliação de Tijolos Ecológicos Compostos por Lodo de Eta e Resíduos da Construção Civil.** In: XI Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, 2014.

MEIRELES, J. R.; RASSI, K. C. A.; NUNES, W. C. **Revisão da Literatura sobre Reciclagem de Resíduos Sólidos da Construção Civil em parâmetro mundial.**

Pontifícia Universidade Católica de Goiás. TCC (Graduação em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2022.

MENDONÇA, A. M. G. D.; CARTAXO, J. M.; MENEZES, R. R.; SANTANA, L. N. L.; FERREIRA, H. C. **Expansão por umidade de revestimentos cerâmicos incorporados com resíduos de granito e caulim.** Cerâmica 58 (2012) 216-224.

MENDONÇA, A. M. G. D.; SOUSA, L. M. C.; NETO, V. F. de S.; ARAÚJO, M. L. R. de; SILVA, M. T. R. e. **Aproveitamento de Resíduo de Caulim na Produção de Blocos Cerâmicos.** VIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental Campo Grande/MS – 27 a 30/11/2017.

MENEZES, R. R. et al. **Utilização do resíduo do beneficiamento do caulim na produção de blocos e telhas cerâmicos.** Revista Matéria, v. 12, n. 1, p. 226-236, 2007a.

NASCIMENTO, M. R. do; DINIZ, A. M. P.; ARAÚJO, M. H. P. de O. **Reaproveitamento do Rejeito de Caulim, de Junco do Seridó-PB, na Síntese de Zeólitas.** Revista Principia, João Pessoa, n. 23, p. 77-86, Ago. 2015.

PINHEIRO, R. J. B.; SOARES, J. M. D. **Utilização de Solos Arenosos para Obtenção de Tijolos de Solo-Cimento.** Cerâmica Industrial, 15 (5-6), Setembro/Dezembro, 2010.

PINTO, A. F.; SOUSA, A. L. F.; MOREIRA, M. A.; MARTINS, C. M. **A GESTÃO DE RESÍDUOS DE MINÉRIO DE MANGANÊS SOB ÓTICA DA ECONOMIA CIRCULAR.** X Colóquio Organizações, Desenvolvimento e Sustentabilidade – CODS 2019, Belém/PA – 11 a 13 de novembro.

RIBEIRO, S. V. **REUTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE ROCHA ORNAMENTAL NA PRODUÇÃO DE TIJOLO SOLO-CIMENTO.** Dissertação (Mestrado em Engenharia

e Ciência dos Materiais) – Campo dos Goytacazes – RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense, 2013.

SAAD, A. Z.; TRZASKOS, B.; VASCONCELOS, E. M. G. CARACTERIZAÇÃO MINERAL E TECNOLÓGICA DE RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DE ARENITOS DA FORMAÇÃO FURNAS: ESTUDO DE CASO AREAL COSTA, CAMPO LARGO-PR. São Paulo, UNESP, Geociências, v. 38, n.1, p. 73-87, 2019.

SANTO CONCRETO. O Tijolo Ecológico X Tijolo Convencional 2021. Disponível em: <https://santoconcreto.com.br/construcao-civil/o-tijolo-ecologico-x-tijolo-convencional/>. Disponível em 05 de jul. de 2021.

SANTOS, C. Prevenção à Poluição Industrial: Identificação de Oportunidades, Análises dos Benefícios e Barreiras. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

SCAPIN, M. A. APLICAÇÃO DA DIFRAÇÃO E FLUORECÊNCIA DE RAIOS X (WDXRF): ENSAIOS EM ARGILOMINERAIS. Dissertação (Mestrado em Ciências na área de Tecnologia Nuclear – Minerais) – São Paulo – SP, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, 2003.

SIQUEIRA, J. S.; SOUZA, C. A. G.; SOUZA, J. A. S. REAPROVEITAMENTO DE CINZAS DE CARVÃO MINERAL NA FORMULAÇÃO DE ARGAMASSAS. Cerâmica vol.58 no. 346 São PauloApri./June 2012.

SILVA, D. C. Da; CLAUDINO, C. M. de A.; SOUZA, J. G. de; SENA, T. de S.; NASCIMENTO, M. das V. do. A influência do traço na resistência à compressão do concreto. Anais CONADIS... Campina Grande: Realize Editora, 2018.

SILVA, M. S.; SANTANA, G. P. Caulinita: Estrutura Cristalina,Técnicas Físicas de Estudo e Adsorção. Scentia Amazonia, v.2, n. 3, 54-70, 2013.

SOUSA, N. G.; AYRES, M. A. C.; LOIOLA, E. O REAPROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NA PRODUÇÃO DE CERÂMICA COMO FATOR DE REDUÇÃO DE CUSTOS. R.gest. sust. ambient., Florianópolis, v. 9, n. 3, p. 867-882, jul/set. 2020.