



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE JURUTI
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MINAS**

FELIPH DE SOUSA ROCHA

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO REJEITO DE BAUXITA COMO
INSUMO PARA FABRICAÇÃO DE TIJOLOS SOLO CIMENTO**

**JURUTI-PA
2023**

FELIPH DE SOUSA ROCHA

**ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO REJEITO DE BAUXITA COMO
INSUMO PARA FABRICAÇÃO DE TIJOLOS SOLO CIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, para obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Minas; Universidade Federal do Oeste do Pará, Campus Universitário de Juruti.

Orientador: Msc. Michael José Batista dos Santos

**JURUTI-PA
2023**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas – SIBI/UFOPA

R672a Rocha, Feliph de Sousa

Análise das propriedades físicas do rejeito de bauxita como insumo para a fabricação de tijolos solo cimento / Feliph de Sousa Rocha – Juruti, 2022.

49 p. : il.

Inclui bibliografias.

Orientador: Michael José Batista Santos

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Campus Universitário de Juruti, Bacharelado em Engenharia de Minas.

1. tijolo ecológico. 2. bauxita. 3. aproveitamento de rejeitos. I. Santos, Michael José Batista, *orient.* II. Título.

CDD: 23 ed. 622.7

Bibliotecária - Documentalista: Maria de Nazaré Eleutério de Brito – CRB/2 1244

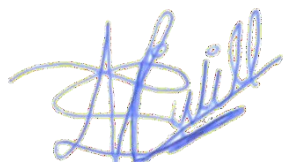
FELIPH DE SOUSA ROCHA

ANÁLISE DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO REJEITO DE BAUXITA COMO INSUMO PARA FABRICAÇÃO DE TIJOLOS SOLO CIMENTO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas, para obtenção do grau de bacharel em Engenharia de Minas; Universidade Federal do Oeste do Pará, Campus Universitário de Juruti.

Conceito: 8,5

Data de Aprovação: 16/01/2023.



gov.br

Documento assinado digitalmente

MICHAEL JOSE BATISTA DOS SANTOS

Data: 30/01/2023 15:57:52-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Msc. Michael José Batista dos Santos
Universidade Federal do Oeste do Pará – UFOPA



gov.br

Documento assinado digitalmente

DENILSON DA SILVA COSTA

Data: 30/01/2023 13:26:49-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Prof. Dr. Denilson da Silva Costa
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará – UNIFESSPA



gov.br

Documento assinado digitalmente

ANA CLAUDIA FRANCA GOMES

Data: 31/01/2023 12:05:47-0300

Verifique em <https://verificador.iti.br>

Profª. Dra. Ana Cláudia Franca Gomes
Universidade Federal de Mato Grosso - UFMT

*Dedico este trabalho ao meu pai Braz Rocha (in
memoriam) e minha Mãe Goreth Mary.*

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus por ser o Escritor da minha história, dos meus sonhos e por nunca me desamparar.

À minha querida mãe Goreth Rocha, que sempre me incentivou e me deu condições para trilhar o caminho da educação.

À minha família e amigos que são alicerces que motivaram a conquistar e realizar meus sonhos, contribuindo de alguma forma para que este trabalho pudesse ser elaborado.

À Renata Duarte, por ter me ajudado, incentivado e me compreendido nos momentos em que precisei.

Ao Professor Me. Michael Santos por ter me acompanhado e instruído desde o início desse projeto.

À Alcoa, em nome dos Engenheiros Gustavo Correia e Leonardo Oliveira, pelo incentivo ao desenvolvimento deste trabalho e que propiciaram a coleta das amostras.

*“Eu posso ouvir o som
Ouço a voz do alto a me dizer
Sê valente, sê valente
Eu posso ouvir o som
Ouço a voz do alto a me dizer
Sê valente, sê valente.”
(Marcos Almeida – Sê valente)*

RESUMO

O setor minerário vem explorando e gerando um alto volume de resíduos que são causadores de vários problemas ambientais no mundo, principalmente no Brasil. Sendo assim, cada vez mais se torna necessário a busca por novas alternativas de utilização desses resíduos para que se minimizem os impactos gerados por sua disposição. Uma dessas aplicações é o uso na fabricação de tijolo solo cimento ou tijolo ecológico, aliando baixo custo e sustentabilidade. O objetivo desse estudo é analisar a viabilidade das características físicas do rejeito de bauxita através de testes realizado em laboratório privado, sendo ensaios de granulometria, Limites de Atterberg e compactação. A metodologia da pesquisa foi quantitativa utilizando a abordagem do estudo de caso. No que concerne à natureza, o estudo é de cunho aplicado, sendo uma pesquisa exploratória. Os resultados revelaram que a mistura entre os rejeitos estudados no traço de 1:1 atendem os parâmetros físicos que viabilizaram o seu uso na modelagem dos tijolos solo cimento.

Palavras-Chaves: Tijolo ecológico. Bauxita. Aproveitamento de rejeitos.

ABSTRACT

The mining sector has been exploring and generating a high volume of waste that is that cause of several environmental problems in the world, especially in Brazil. Thus, it is increasingly necessary to search for new alternatives for the use of these wastes to minimize the impacts generated by their disposal. One of these applications is the use in the manufacture of soil-cement brick or ecological brick. The objective of this study is to analyze the feasibility of the physical characteristics of bauxite tailings for total replacement of the soil in the manufacture of ecological bricks, combining low cost and sustainability. The research methodology was quantitative using the case study approach. Regarding the nature, the study is of applied nature, being exploratory research. The results revealed that the mixture between the studied waste in the proportion of 1:1 meets the physical parameters that enabled its use in the manufacture of soil-cement bricks.

Keywords: Ecologic brick. Bauxite. Utilization of tailings.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Produção Mineral Brasileira - PMB	17
Figura 2 - Tijolo maciço de solo cimento (a) e tijolo vazado de solo cimento (b).....	24
Figura 3 - Revestimento de parede com tijolos comuns (a) e ecológico (b)	25
Figura 4 - Exemplo de prensas manual (a) e hidráulica (b).....	26
Figura 5 - Localização do Município de Juruti.....	29
Figura 6 - Complexo da Mina de Bauxita de Juruti.	30
Figura 7 - Lagoas: a) Rejeito “A” - LE b) Rejeito “B” - LD3.....	31
Figura 8 - Limites de Atterberg.	33
Figura 9 - Material peneirado	34
Figura 10 - Mistura e umidade	34
Figura 11 - Prensa semianual (hidráulica).....	35
Figura 12 - Cura dos tijolos ecológicos	35
Figura 13 - Tijolo ecológico – Amostra C.....	39

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Limite das frações de solos pelo tamanho dos grãos	22
Quadro 2 - Tipos de cimentos utilizados na fabricação de tijolos ecológicos.....	23
Quadro 3 - Tipos de tijolos de solo cimento encontrados no mercado brasileiro.....	24
Quadro 4 - Tipos e dimensões nominais dos tijolos (dimensões em milímetros)	27
Quadro 5 - Amostras	32
Quadro 6 - Normas para caracterização do solo.....	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Análise Granulométrica.....	37
Tabela 2 - Limites de Consistência e Índice de Plasticidade.....	37
Tabela 3 - Resultados dos ensaios de compactação	38
Tabela 4 - Análise dimensional dos tijolos.....	40
Tabela 5 - Desvio padrão dos tijolos.....	40

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curvas granulométricas	36
Gráfico 2 - Curvas de compactação.....	38

LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
PIB	Produto Interno Bruto
IBRAM	Instituto Brasileiro de Mineração
PMB	Produção Mineral Brasileira
ABAL	Associação Brasileira de Alumínio
ADRB	Área de Disposição de Resíduos de Bauxita
IBDA	Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Construtivo
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
LE	Lagoa de Espessamento
LD3	Lagoa de Disposição 3

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Justificativa	15
1.2 Objetivos.....	15
1.2.1 Objetivo Geral	15
1.1.2 Objetivos Específicos	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	17
2.1 Indústria da Mineração.....	17
2.2 Bauxita.....	19
2.3 Rejeito de Mineração de Bauxita	20
2.4 Matérias-primas para a Produção de Tijolos Ecológicos	22
2.5 Tijolos Ecológicos	24
2.6 Processo Produtivo dos Tijolos de Solo cimento.....	26
3 MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 Local de Origem do Rejeito	29
3.2 Caracterização do rejeito	32
3.2.1 Seleção da Amostra	32
3.2.2 Ensaio Granulométrico	33
3.2.3 Limites de Atterberg.....	33
3.2.4 Ensaio de Compactação.....	34
3.3 Cimento Portland	34
3.4 Fabricação Tijolo Ecológico	34
4 RESULTADOS E ANÁLISES	37
4.1 Caracterização do Rejeito.....	37
4.1.1 Análise Granulométrica.....	37
4.1.2 Limites de Atterberg.....	38
4.1.3 Compactação	38
4.2 Tijolo Ecológico	40
4.2.1 Fabricação.....	40
4.2.2 Dimensionamento.....	40
5 CONCLUSÃO.....	42
6 RECOMENDAÇÕES.....	43
REFERÊNCIAS	44

1 INTRODUÇÃO

A indústria de mineração é uma importante fonte de renda para a economia do País. Pois, os solos do Brasil apresentam grande potencial para esta atividade devido às suas características de diversidade e riqueza. Sendo assim, esta atividade é responsável por cerca de 5% do PIB nacional e abastece uma grande variedade de indústrias, podendo atrair mais de US\$ 38,5 bilhões em investimentos até 2025, além de criar muitos empregos (SANTIAGO, 2021).

Um dos minerais muito extraído no Brasil pela mineração é a bauxita, utilizada como matéria-prima para a produção de alumínio. Embora a indústria da mineração, principalmente da bauxita, seja benéfica para a economia brasileira, suas atividades geram diariamente milhões de toneladas de resíduos no processo produtivo. Assim, o descarte desses materiais no meio ambiente causa sérios problemas de degradação ambiental. Pois, o rejeito que não é tratado ocupa uma grande área de terra, como também pode poluir a água e o ar, colocando em risco a segurança social e ambiental (ARMSTRONG *et al.*, 2019).

A disposição dos rejeitos de bauxita é realizada em locais devidamente projetados para minimizar os possíveis impactos socioambientais de sua produção (GOMES *et al.*, 2017). Diferentes técnicas de disposição podem ser encontradas na literatura especializada, no entanto, o método mais comum envolve seu acúmulo através de estruturas denominadas como barragens de rejeitos (LUMBROSO *et al.*, 2019). Esse armazenamento gera muitas preocupações, dentre as quais a segurança (BRUSCHI, 2022).

Diante disso, devido aos diversos problemas causados pelo rejeito de bauxita ao meio ambiente, melhores alternativas para o seu aproveitamento estão sendo estudadas, pois não é adequado nem seguro armazená-los em barragens, sem contar que podem contaminar o solo, as águas superficiais e subterrâneas, além do alto risco de acidentes (COSTA, 2021).

Uma alternativa para o aproveitamento do rejeito de mineração é a produção de tijolos de solo cimento. Este tipo de tijolo já é praticado efetivamente no Brasil e pode ser usado de forma ampla como na construção de moradias populares, principalmente por meio de sistema de mutirão, promovendo o desenvolvimento socioeconômico e ambiental de populações de baixa renda (PINTO, 2015).

Os tijolos de solo cimento, considerando todos os aspectos envolvidos, podem contribuir para a construção de novos paradigmas, pois são desenvolvidos a partir de materiais com processos muito menos agressivos ao meio ambiente, pois não há queima e os resíduos do descarte podem ser reaproveitados e a fabricação que pode ser realizada por qualquer pessoa, ou seja, até mesmo pelos moradores da habitação a construir (NASCIMENTO, 2015).

Os compostos de tijolos solo cimento também conhecidos como tijolos ecológicos, são fabricados por meio da mistura de solo, cimento e água, que endurecem após prensagem e cura. Dentre os diversos benefícios desses tijolos evidencia-se a possibilidade de agregar outros tipos de materiais à mistura. Normalmente os materiais utilizados provêm de resíduos, o que o torna um material sustentável que reduz a utilização de recursos minerais e impactos ao meio ambiente (LEMOS *et al.*, 2019).

Considerando a importância ambiental e a conscientização acerca do uso racional dos recursos, este trabalho visa contribuir por meio do aproveitamento do rejeito de mineração de bauxita para fabricação de tijolos ecológicos.

1.1 Justificativa

A relevância desta pesquisa é que a economia, o meio ambiente e o social devem sempre andar juntas ao usar tecnologias que minimizem o impacto ambiental. Neste sentido, reaproveitar resíduos industriais e utilizá-los na construção civil pode reduzir muito o consumo de matéria-prima e energia, além de obter materiais compósitos com funções semelhantes às existentes a um preço mais atrativo (PEDROSO, 2020).

Portanto, a utilização de rejeitos de minério como materiais alternativos de construção civil pode ser uma possibilidade viável para reduzir o passivo ambiental decorrente da disposição em barragens. Sem contar que seu reaproveitamento é economicamente interessante para as mineradoras (COSTA, 2021).

Sendo assim, a justificativa deste estudo é que o aproveitamento do rejeito de minério contribui com a diminuição dos impactos ambientais ao meio ambiente, além do desenvolvimento de um novo produto que colabora não somente para a economia, mas também para diminuição de utilização de matéria-prima e dos recursos naturais.

Além disso, este trabalho tem o intuito de proporcionar às empresas e sociedade o conhecimento acerca da utilização do rejeito de minério para produção de tijolos ecológicos. Ainda, contribui com novos dados para a comunidade científica e discussões em relação ao tema entre estudantes e professores da área.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade das características físicas do rejeito de bauxita para substituição total do solo na fabricação de tijolos ecológicos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Realizar a caracterização físicas do rejeito: determinando a massa específica, da área superficial específica, distribuição granulométrica e Limites de Consistência;
- Analisar as propriedades físicas de acordo com as normas vigente na ABNT NBR 10833 (2013);
- Efetuar a confecção dos tijolos de solo cimento a partir da substituição do solo pelo rejeito de bauxita, para avaliação preliminar.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

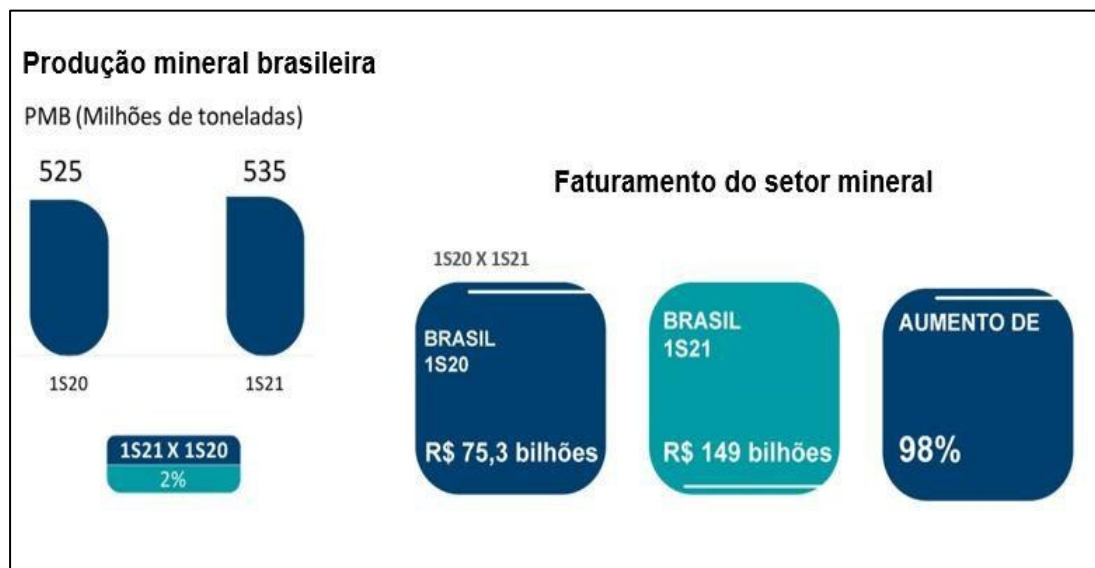
2.1 Indústria da Mineração

A mineração é considerada uma atividade industrial cuja função é extrair minerais do solo, seja por meio de perfuração ou acesso a áreas de jazidas minerais (LOPES, 2015). As primeiras evidências acerca da atividade de mineração no Brasil foram ao final do século XVII, quando se iniciou a exploração do ouro no estado de Minas Gerais (FARIAS, 2002). Depois disso, a mineração tornou-se um setor extremamente importante para economia brasileira, responsável pela aquisição de insumos para metalurgia, siderurgia, fertilizantes, petroquímica e outras indústrias (SILVA, 2017).

O Brasil possui grande potencial para a mineração e é uma jazida importante no mundo, contendo cerca de 72 minerais, sendo 23 metálicos, 4 combustíveis e 45 não metálicos. O país produz principalmente o minério de ferro, a bauxita, o manganês e o nióbio, respondendo por mais de 90% do comércio mundial de nióbio (SILVA, 2017).

A Figura 1 demonstra como foi a Produção Mineral Brasileira - PMB no 1 semestre de 2020 e 2021 (IBRAM, 2021).

Figura 1 - Produção Mineral Brasileira – PMB



Fonte: IBRAM (2021).

Em comparação com o primeiro semestre de 2020, o valor da produção e a receita tributária do setor de mineração aumentaram cerca de 98% no primeiro semestre de 2021. O valor das exportações apresentou comportamento semelhante: um aumento de 91%. O saldo comercial de minério, diferença entre importações e exportações, dobrou mais que: 110,5% (IBRAM, 2021).

Para realizar a exploração mineral, é preciso efetuar um estudo detalhado de viabilidade e um planejamento cuidadoso da área a ser explorada, além de avaliar as condições geológicas, sociais e ambientais para uma exploração segura e viável, com o objetivo de no futuro ela seja restaurada e utilizada para outros fins. Além disso, alguns aspectos devem ser considerados como base para definir se a exploração é viável e como ela é realizada (LOPES, 2015):

- Fornecer aos trabalhadores condições ambientais adequadas e seguras;
- Diminuir o impacto ambiental;
- Minimizar e controlar a geração de resíduos;
- Adaptação das condições geológicas às infraestruturas disponíveis;
- Aumento da produtividade, que tem impacto direto na redução de custos.

O beneficiamento do minério é uma atividade voltada para a obtenção de um produto com alto teor de minerais úteis, sendo efetuado a lavra, o beneficiamento e o tratamento de rejeitos para atingir esse objetivo. Para a escolha do método, devem ser avaliados aspectos técnicos, sociais, econômicos e políticos. A etapa da lavra é o conjunto de atividades que extraem a rocha na qual se encontra o minério. Existem alguns tipos de lavra comumente utilizados no Brasil que são: lavra a céu aberto, lavra subterrânea, lavra manual ou mecânica e dragagem (ABREU, 2010).

O processamento do minério consiste em uma série de etapas destinadas a separar o minério dos rejeitos e concentrá-lo em um material mais puro. Entretanto, o seu processo depende do minério a ser explorado e a metodologia empregada, segue algumas das etapas (GRUPO VISION, 2017):

- Britagem: é a etapa que diminui o tamanho das partículas do minério por meio de peneiras e britadores.
- Moagem: também usada para reduzir o tamanho das partículas, mas através de um moedor para adaptar o material à próxima etapa.
- Deslamagem: remoção de partículas ultrafinas que podem ser prejudiciais nas etapas subsequentes do processamento.
- Peneiramento: etapa de separação do minério desejado dos rejeitos por análise granulométrica.
- Jigagem: também separa minério de rejeitos, mas por densidade.
- Separação Magnética: a separação também é realizada, mas usando magnetismo.

- Flotação: fase que separa o minério dos rejeitos por propriedades químicas e ajusta-o quimicamente.

Por fim, será gerado dois resultados, o produto de interesse que é vendido por um preço determinado segundo o teor de minério presente nele. E o rejeito do processo, que cada vez mais os órgãos de fiscalização exigem alternativas para a disposição final desse material.

2.2 Bauxita

A bauxita é uma rocha sedimentar avermelhada composta por dióxido de alumínio (Al_2O_3) e outros componentes presentes em pequenas quantidades, como dióxido de silício, dióxido de titânio (TiO_2), silicato de alumínio e óxido de ferro, cujos principais componentes são: bohemita trihidratada de alumínio e diásporo, o nome vem da cidade francesa de Le Beau, onde a rocha foi descoberta pela primeira vez em 1821 pelo geólogo Pierre Berthier (NOGUEIRA *et al.*, 2021).

As reservas mundiais conhecidas de bauxita são estimadas em aproximadamente 70 bilhões de toneladas. As reservas de bauxita do Brasil estão entre as maiores do mundo e atualmente ocupam o terceiro lugar com 2,6 bilhões de toneladas de minério (ABAL, 2017).

A mineração de bauxita no Brasil é voltada principalmente para o aproveitamento da alumina, por meio de um processo de redução, que posteriormente produz o alumínio primário, que pode ser convertido em alumínio líquido, lingotes, placas, entre outros (NOGUEIRA *et al.*, 2021).

A bauxita é dividida em dois grupos de acordo com a proporção de minerais constituintes que podem ser: Bauxita de grau metalúrgico: alta proporção de gibbsita; bauxita não metalúrgica ou de grau refratário: maior proporção de diásporo (RODRIGUES, 2012).

O beneficiamento dos minérios de bauxita inicia-se na britagem para a redução do tamanho, lavagem do minério com água para diminuir o teor de sílica contida na parcela mais fina e secagem (ABAL, 2022). No processo tradicional de obtenção do alumínio são realizadas as fases de mineração, refino e redução. A bauxita antes de ser extraída, lavada e seca é encaminhada para refinarias onde é produzida a alumina (QUARESMA, 2009).

Na fase de refino para obtenção da alumina é realizada a moagem e dissolução da alumina em soda cáustica. Depois é feita a filtração da alumina para a separação do material sólido que é concentrado para a cristalização da alumina. Estes cristais são secados, precipitados e calcinados para eliminar a água. Em seguida, o pó branco de alumina pura é encaminhado à

redução da alumina calcinada em cubas eletrolíticas, onde ocorre o processo de redução eletrolítica denominada como Hall Hérault (ABAL, 2022).

Durante a etapa de redução, a alumina calcinada é dissolvida em um banho de criolita fundida e fluoreto de alumínio a baixa pressão, decompondo-se em oxigênio. O oxigênio se combina com o ânodo de carbono, liberando-se como carbono e no alumínio líquido que se deposita no fundo da cuba de eletrólise. O metal líquido (alumínio primário) é transferido para o forno de refusão por meio de cadinhos, onde são produzidos os lingotes, chapas e tarugos de metais primários (ABAL, 2022).

2.3 Rejeito de Mineração de Bauxita

Os rejeitos são rochas ou minerais inutilizáveis presentes no minério que são separados total ou parcialmente durante o processamento. Estes dois resíduos minerais, estéril e rejeitos devem ser armazenados em locais prontos para recebê-los de acordo com as normas técnicas, a fim de minimizar o impacto ambiental que possa levar à poluição do solo, dos rios e do ar e garantir o menor impacto visual possível (LIMA, 2016).

De acordo com a Associação Brasileira de Alumínio – ABAL (2022) na etapa primária do beneficiamento da bauxita, o resíduo da lavagem é apenas argila sem aditivos químicos. Nos depósitos os rejeitos são compactados e parte da água recuperada é reaproveitada no processo, diminuindo o risco de vazamentos da barragem. Com o tempo, essa argila se deposita e seca no reservatório. A água residual é retirada até que as condições permitam revegetar o antigo sedimento, possibilitando a recuperação da área.

Ainda segundo a ABAL na fase de transformação da bauxita em alumina os resíduos gerados são encaminhados para a Área de Disposição de Resíduos de Bauxita – ADRB, que é licenciada pelo órgão ambiental, projetada e construída de acordo com as melhores práticas de segurança do setor. A água depositada no ADRB, ainda com traços de alcalinidade, também é devolvida ao processo após lavagem e filtração contínuas dentro da refinaria.

O processamento industrial da mineração está crescendo a cada ano à medida que aumenta a demanda por produtos minerais. Entretanto, esse processo de obtenção e beneficiamento do minério gera rejeitos que oferecem riscos ambientais. Esse rejeito é a parte do minério que não contém minerais úteis e não tem valor econômico, obtido por meio do processo de beneficiamento e é a principal causa do impacto ambiental das mineradoras (LOZANO, 2006). Logo, para a aplicação adequada da gestão ambiental, o manuseio e

armazenamento desses resíduos são de extrema importância para melhorar a segurança no descarte e minimizar os custos da empresa (SILVA, 2017).

Nesse sentido, são armazenados em barragens de segurança para reter os rejeitos, sólidos e a água do processamento do minério. Essas barragens são construídas em etapas à medida que os rejeitos são produzidos, reduzindo assim os custos de construção e operação. As barragens de rejeito causam impactos ambientais e, além disso, podem ocorrer acidentes graves como, por exemplo, o seu rompimento (SILVA, 2017).

Sendo assim, para diminuir os impactos que os rejeitos causam ao meio ambiente, uma das alternativas é a produção de materiais que podem ser usados na construção civil. Esta alternativa além de ser uma opção para a reutilização de materiais descartados, ainda é uma forma de agregar proteção ambiental e sustentabilidade à construção civil. Pois, este setor é um grande utilizador dos recursos naturais, que muitas vezes não são renováveis, podendo provocar a diminuição da sua qualidade ou até levar a escassez desses recursos (HOLANDA; SILVA, 2011).

A indústria de cerâmica vermelha, onde sua principal matéria-prima é a argila, é uma área potencial de aplicação de rejeitos. O Aproveitamento de resíduos na cadeia de abastecimento ajuda a proteger o meio ambiente e a proteger jazidas naturais de argila (MONTEIRO; VIEIRA, 2012). Além disso, a indústria de cerâmica vermelha é muito promissora para a absorção de resíduos. As massas cerâmicas são de natureza heterogênea e podem tolerar a adição de vários resíduos de vários tipos e origens (SOUZA; VIEIRA; MONTEIRO, 2008).

Pesquisas relacionadas à produção de materiais cerâmicos com rejeitos de bauxita vêm sendo desenvolvidos a fim de avaliar sua viabilidade. Babisk (2015) estudou rejeito de bauxita, extraído pelo processo Bayer, em cerâmica vermelha, analisando o conteúdo do material a ser estudado de 17% a 100% e os resultados foram que segundo as normas vigentes, o material pode ser utilizado em diversos produtos, desde tijolos perfurados até telhas cerâmicas. Arhin *et al.* (2012) avaliaram o uso de altas concentrações de resíduos (50%, 60%, 70% e 80%) misturados com argila para a produção de corpos de prova prismáticos e foi possível adicionar cerca de 50% de resíduos a essas amostras de teste para alcançar um produto adequado.

No estudo de Louzada *et al.* (2019) foi mostrado que a produção de tijolos cerâmicos de rejeitos de bauxita e argila amarela são uma alternativa viável que contribui para a tecnologia, meio ambiente e economia. Assim sendo, o uso dessas alternativas para reutilização dos rejeitos, impede que eles sejam encaminhados para barragens e fiquem sem utilização ou

sejam descartados no meio ambiente de forma incorreta e sem o devido tratamento, cooperando com o desenvolvimento sustentável.

2.4 Matérias-primas para a Produção de Tijolos Ecológicos

As matérias-primas utilizadas para fabricação de tijolos ecológicos são a partir da mistura homogênea de solo, cimento Portland e água. Sendo que, o principal insumo para produção é o solo que é abundante no meio ambiente, com baixo custo, além de poder usar os tijolos na construção civil (LIRA, 2020).

A ABNT (NBR 6502/1995) define solo como “material proveniente da decomposição das rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não ter matéria orgânica”. Entretanto, existe uma definição simples que se adapta aos propósitos das ciências da terra, que considera o solo como o produto da decomposição e desintegração da rocha pela ação de agentes atmosféricos. Assim, todos os solos “originam-se da decomposição das rochas que constituíam inicialmente a crosta terrestre” (PINTO, 2006, p.14), essa decomposição pode ser classificada em intemperismo mecânico (mantém a composição mineralógica original da rocha mãe) ou químico (modifica a estrutura mineral das partículas).

Conforme Pinto (2006), o solo pode ser diferenciado, inicialmente, pelo tamanho de suas partículas, porém, em um solo, geralmente, convivem partículas de diversos tamanhos que não são fáceis de serem identificadas com o seu manuseio quando secas. Quando as argilas estão úmidas, a aglomeração forma uma pasta úmida e assim surge a facilidade de identificar areias e argilas.

A NBR 6502 (ABNT, 1995), que aborda as definições técnicas relativas as rochas e solos, divide suas partículas de acordo com suas dimensões, adotando frações apresentadas no Quadro 1.

Quadro 1 - Limite das frações de solos pelo tamanho dos grãos.

Fração	Limites
Matacão	200 mm a 1 m
Pedra	60 mm a 200mm
Pedregulho	2 mm a 60 mm
Areia	2 mm a 0,06 mm
Silte	0,002 mm a 0,06 mm
Argila	Menor que 0,0002 mm

Fonte: NBR 6502 (1995), Adaptado pelo autor (2023).

Para a fabricação dos tijolos ecológicos é necessário usar o solo arenoso devido a maior quantidade de areia e menor argila. Sendo assim, não é recomendado um solo com muita argila devido à dificuldade de compactação. Além disso, o solo da mistura deve estar limpo e isento de galhos, folhas, raízes ou matéria orgânica. Pois, os solos que contêm muitas substâncias não são adequados para a produção de solo cimento (CAMPOS, 2008).

Alguns parâmetros são recomendados para caracterizar o solo a ser utilizado na produção dos tijolos de solo cimento, ABNT NBR 10833 (2013):

- 100% do material deve passar por uma peneira de 4,8 mm;
- 10% a 50% do material deve passar por peneira de 0,42 mm;
- Liquidez menor ou igual a 45%;
- Índice de plasticidade menor que 18%.

A água é um componente que afeta de maneira direta as características físicas e mecânicas dos tijolos ecológicos. O Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Construtivo – IBDA recomenda que a água usada no processo seja medida corretamente, pois se for inserida em excesso fará com que o material perca a resistência e rache, e se não for adicionada água suficiente levará a uma compactação ruim e o solo cimentado perderá sua resistência mecânica (CAMPOS, 2008).

Cimento Portland é o nome global para o material comumente conhecido como cimento. Segundo a Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP, sendo composto por um pó fino com propriedades aglomerantes, aglutinantes ou ligantes que endurece se misturado com água e não se decompõe quando a água é adicionada novamente após o endurecimento (ABCP, 2002). Existem vários tipos de cimentos no Brasil que são apresentados no Quadro 2.

Quadro 2 – Tipos de cimentos utilizados na fabricação de tijolos ecológicos

Tipo de cimento portland	Sigla	Composição (% em massa)				Norma Brasileira
		Clínquer + gesso	Escória granulada de alto-forno (sigla E)	Material pozolânico (sigla Z)	Material carbonático (sigla F)	
Comum	CP I	100	-			NBR 5732
	CP I-S	99-95	1-5			
Composto	CP II-E	94-56	6-34	-	0-10	NBR 11578
	CP II-Z	94-76	-	6-14	0-10	
	CP II-F	94-90	-	-	6-10	
Alto-Forno	CP III	65-25	35-70	-	0-5	NBR 5735
Pozolânico	CP IV	85-45	-	15-50	0-5	NBR 5736
Alta Resistência Inicial	CP V-ARI	100-95	0-5	-	0-5	NBR 5733

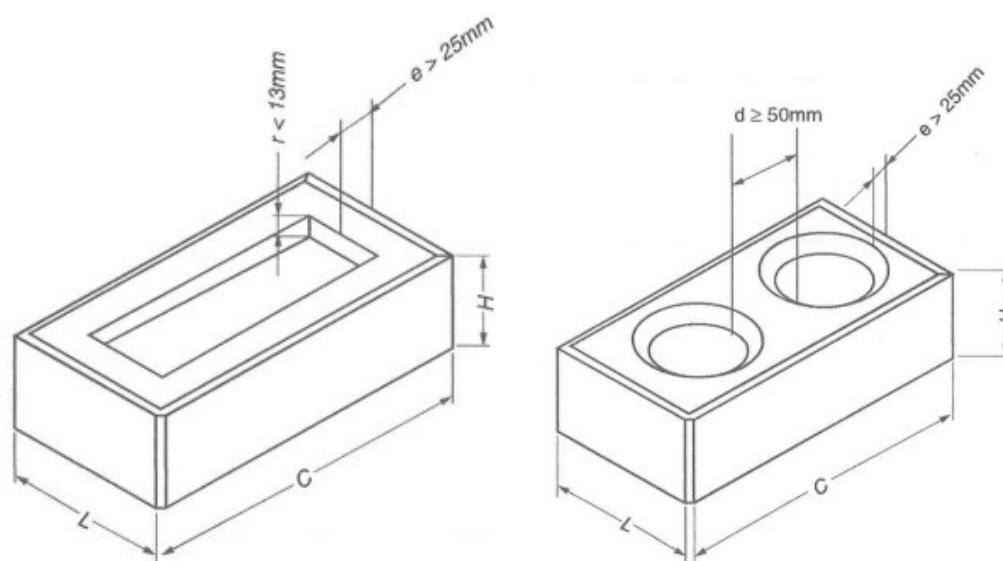
Fonte: ABCP (2002).

Todos os tipos de cimento mencionados acima são geridos pelas normas ABNT. Além desses cimentos mencionados existem os de menor escala de consumo que são: cimento Portland de alta resistência inicial; cimento Portland resistente aos sulfatos; cimento Portland branco; cimento Portland de baixo calor de hidratação; e cimento para poços petrolíferos. (ABCP, 2002).

2.5 Tijolos Ecológicos

A ABNT NBR 8491:2012 conceitua tijolos de solo cimento como sendo considerada uma peça de alvenaria composta por uma mistura homogênea de solo, cimento e água, podendo ser acrescentado também aditivos e/ou pigmentos atendendo os requisitos da Norma, respeitando as dimensões de altura (H) menor que sua largura (L), e sua forma pode ser maciça ou vazada, como mostra a Figura 2.

Figura 2 – Tijolo maciço de solo cimento (a) e tijolo vazado de solo cimento (b)



Fonte: ABNT NBR 8491 (2012).

Existem no mercado brasileiro da construção civil diversos tipos de tijolos ecológicos, com vários modelos e tamanhos diversificados, sendo seu uso pensado para atender as necessidades específicas de cada projeto, mão de obra disponível, equipamentos e materiais. A Quadro 3 apresenta os variados tipos de tijolos solo cimento que podem ser encontrados e vendidos no comércio brasileiro (SILVA, 2018).

Quadro 3 – Tipos de tijolos de solo cimento encontrados no mercado brasileiro

Tipo	Dimensão	Características
Maciço comum	5 x 10 x 20 cm 5 x 10 x 21 cm	Assentamento com consumo de argamassa similar aos tijolos maciços comuns.
Maciço com encaixes	5 x 10 x 21 cm 5 x 10 x 23 cm	Assentamento com encaixes com baixo consumo de argamassa.
½ tijolo com encaixe	5 x 10 x 10,5 cm 5 x 11 x 11,5 cm	Elementos produzidos para que não haja quebra na formação dos aparelhos com juntas desencontradas.
Tijolos com dois furos e encaixes	5 x 10 x 20 cm 6,25 x 12,5 x 25 cm 7,5 x 13 x 30 cm	Assentamento a seco, com cola branca ou argamassa bem plástica. As tubulações passam pelos tubos verticais.
½ tijolo com furo e encaixe	5 x 10 x 10 cm 6,25 x 12,5 x 12,5 cm 7,5 x 15 x 15 cm	Elementos produzidos para acertar os aparelhos, sem a necessidade de quebras.
Canaletas	5 x 10 x 20 cm 6,25 x 12,5 x 25 cm 7,5 x 15 x 30 cm	Elemento empregado para a execução de vergas, reforços estruturais, cintas de amarração e passagens de tubulações horizontais.

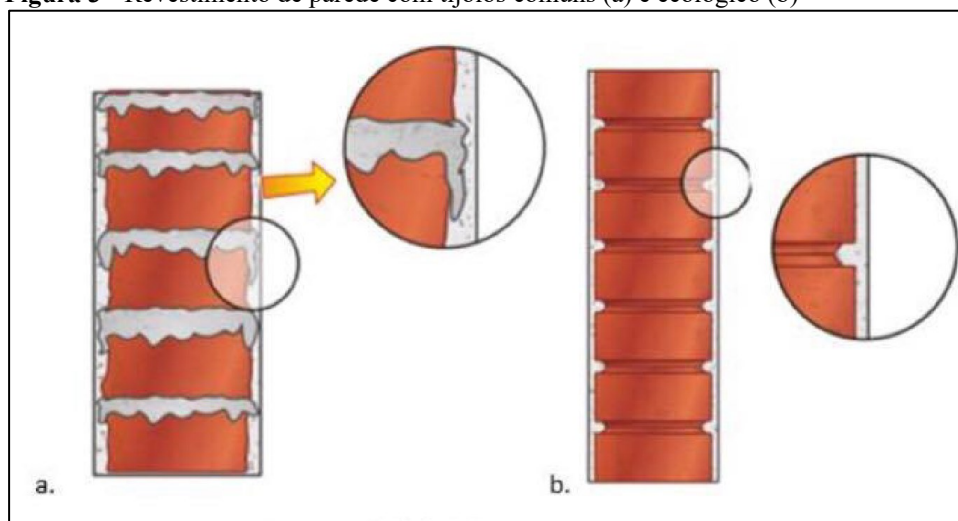
Fonte: PISANI (2007).

Os tijolos ecológicos constituídos de solo cimento possuem diversas vantagens e tem se destacado a cada dia mais, pois não há necessidade de passar pelo processo de queima da cerâmica, evitando assim que os poluentes e gases sejam lançados no meio ambiente, economizando energia e custos com materiais para sua produção (BORBA *et al.*, 2014).

Além disso, o uso de tijolos ecológicos se deve à simplicidade de fabricação, maior resistência à compressão que os tijolos convencionais, utilização de equipamentos de baixo custo, mão de obra capaz de seguir instruções da norma, como: operar os equipamentos e correção da dosagem de mistura e produção dos tijolos. Ainda, esses tijolos podem ser produzidos no canteiro de obras, esteticamente têm um padrão melhor nas peças e com menor consumo de argamassa na fase de assentamento (SOUZA, 2006).

O uso de tijolos ecológicos apresenta algumas vantagens em relação aos tijolos tradicionais. Uma delas é que suas medidas e texturas regulares proporcionam um acabamento definido, evitando correções comuns no assentamento e reduzindo assim o tempo de trabalho (ECO PRODUÇÃO, 2010). As Figuras 3a (cimento comum) e 4b (cimento ecológico) apresentam uma comparação entre as paredes revestidas com tijolos comuns e tijolos ecológicos.

Figura 3 - Revestimento de parede com tijolos comuns (a) e ecológico (b)



Fonte: ECO PRODUÇÃO, 2010.

De acordo com a imagem é perceptível que os tijolos ecológicos proporcionam um melhor acabamento do que o comum, pois, os tijolos ecológicos são mais leves, resistentes, diminuem o peso da obra e formam câmaras termoacústicas que controlam a temperatura interna da casa, além de diminuir a poluição sonora (ECO PRODUÇÃO, 2010).

2.6 Processo Produtivo dos Tijolos de Solo cimento

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT estabelece as principais normas brasileiras existentes para a especificação da produção de tijolos de solo cimento, que são:

- NBR 8491:2012 — Tijolo de solo cimento - Requisitos.
- NBR 8492:1984 — Tijolo maciço de solo cimento — análise dimensional determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio.
- NBR 10832:1989 — Fabricação de tijolo maciço de solo cimento com a utilização de prensa manual. Procedimento.
- NBR 10833:2012 – Fabricação de tijolo e bloco de solo cimento com utilização de prensa manual ou hidráulica — Procedimento.
- NBR 10834:2012 – Bloco vazado de solo cimento sem função estrutural – Requisitos.

De acordo com Campos (2008), a fabricação dos tijolos de solo cimento é realizada por meio de pequenos moldes com uma prensa manual apresentada a figura 4(a). O processo é simples e consiste na inserção do insumo na prensa, nivelar a mistura que aciona a prensa para compactar a mistura e depois acionar a alavanca da prensa e remover os tijolos da forma.

Figura 4 – Exemplo de prensas manual (a) e hidráulica (b).



Fonte: ECOMAQUINAS (2022).

Ainda segundo Campos (2008) após a conclusão da produção, o cimento deve ser curado com cuidado. A cura ocorre em tijolos recém-produzidos, onde devem ser armazenados e não podem ser movidos durante o processo. É necessário molhar os tijolos pelo menos 3 vezes ao dia durante os primeiros 7 dias. Depois desta etapa, os tijolos estarão prontos para serem armazenados em outro local ou utilizados imediatamente. As prensas manuais não produzem blocos de cimento, apenas tijolos. No entanto, a prensa hidráulica pode fazer tijolos e blocos de solo cimento, e a produção é grande, mas o equipamento é caro e só pode ser usado em projetos de grande escala.

Os tijolos devem ser produzidos e curados segundo os procedimentos determinados pela ABNT NBR 10833:2012, além de atender as exigências desta norma. As dimensões nominais dos tijolos têm de ser de acordo com as descritas no Quadro 4.

Quadro 4 – Tipos e dimensões nominais dos tijolos (dimensões em milímetros).

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

Fonte: ABNT NBR 8491 (2012).

É preciso realizar a análise dimensional dos tijolos que devem ser ensaiados de acordo com a ABNT NBR 8492:1984, satisfazendo as tolerâncias permitidas nas dimensões dos tijolos de mais ou menos 1,00 mm para o comprimento (C), largura (L) e altura (H).

Além disso, devem ser realizados ensaios de caracterização físico-mecânica nas amostras dos tijolos de acordo com alguns requisitos específicos para o controle de qualidade que são: a resistência à compressão e absorção da água (ABNT NBR 8491, 2012). Nos ensaios de caracterização deve ser realizado também a determinação da massa específica do solo, granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade (LOUZADA *et al.*, 2019).

No ensaio de resistência à compressão a amostra dos tijolos não deve ser inferior a 2,0 MPa, o valor individual não pode ser menor que 1,7 Mpa, sendo a idade mínima de 7 dias. No ensaio de absorção de água as amostras dos tijolos não podem estar com a média de valores maior que 20% nem valores individuais superiores a 22%, tendo a idade mínima de sete dias (ABNT NBR 8492, 1984).

De acordo com a ABNT NBR 8491:2012 é preciso que o fabricante forneça os tijolos de acordo com as características físico-químicas, assim como os compradores devem verificar se as amostras satisfazem os requisitos de acordo com a norma. Ainda, o comprador deve recusar a amostra se caso as dimensões dos tijolos não apresentem tolerâncias de acordo com o determinado pela análise dimensional.

Além disso, segundo a mesma ABNT NBR 8491:2012 o lote dos tijolos pode ser recusado se os resultados médios dos ensaios de resistência à compressão e absorção de água não condizem às medidas estabelecidas pela norma.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste trabalho é proposto o estudo da substituição total do solo argiloso por rejeito de minério de bauxita, abordando sua caracterização física, na formulação de tijolos solo cimento. Os itens abaixo abordam sobre a metodologia que foi empregada para caracterizar o rejeito segundo a ABNT NBR 10833 (2013).

Quanto a abordagem o estudo proposto é de caráter quantitativo, pois em conformidade com Santos *et al.* (2014) enfatiza os indicadores numéricos e os percentuais sobre o objeto estudado. Neste caso, será por intermédio de procedimentos como análises laboratoriais, tabelas, dentre outros. No que concerne à natureza, o estudo é de cunho aplicado, pois busca produzir conhecimentos que possam, de fato, serem aplicados (OLIVEIRA, 2019).

É uma pesquisa exploratória, segundo os objetivos, visando um acesso mais próximo com o problema investigado e oferecendo mais informações sobre este tipo de objeto estudado (PIOVESAN; TEMPORINI, 1995).

Todos os ensaios de caracterização física do rejeito de bauxita foram realizados no Laboratório de Solos e Concreto da empresa *AC Parceria*.

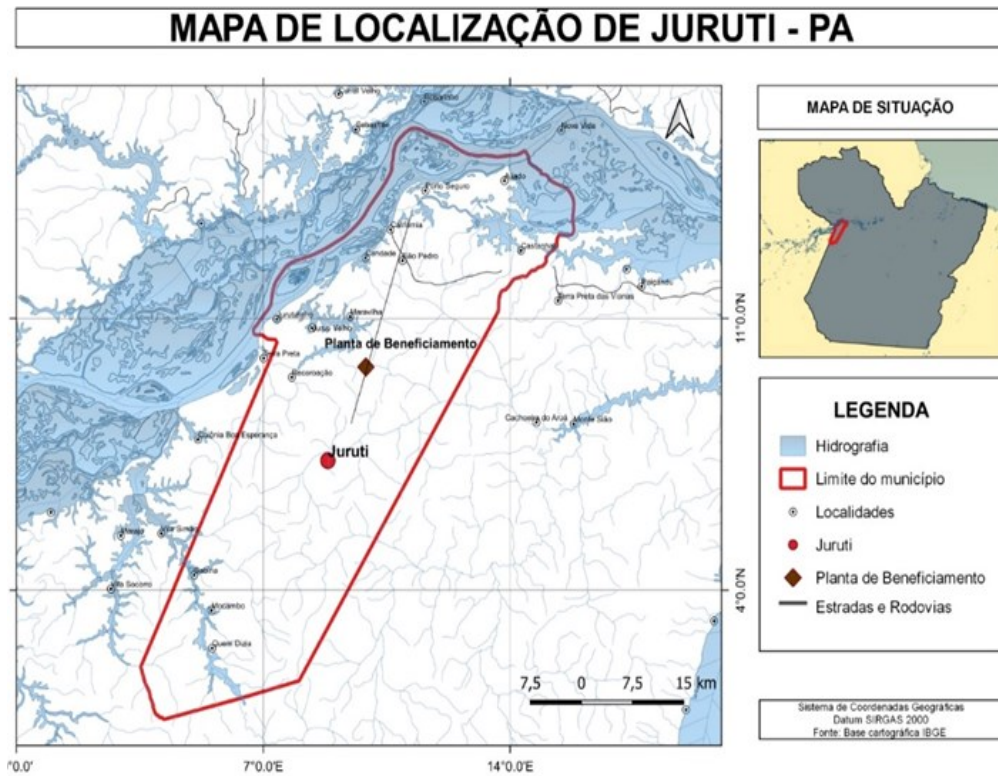
A caracterização consistiu dos seguintes ensaios: análise granulométrica, determinação dos limites de Atterberg e de compactação. Os experimentos são necessários para a constatação da viabilidade dos materiais para o fim proposto.

3.1 Local de Origem do Rejeito

A área de estudo está localizada no município de Juruti, situada à margem direita do Baixo Amazonas, porção noroeste do Estado do Pará, em divisa com o Amazonas. O acesso à cidade partindo da cidade polo industrial mais próxima, Santarém, se dá pelo rio Tapajós a 200 km via barco. O empreendimento coordenado pela Alcoa World Alumina encontra-se a 56 km do município.

Possui uma área de 8.306,298 Km² com a população de 47.086 habitantes de acordo com o censo 2010, com uma estimativa de 59.961 habitantes em 2021, o que corresponde a uma densidade de 5,67 habitantes por quilômetro quadrado (IBGE, 2021). A figura 5 traz a visualização da localização do município.

Figura 5 - Localização do Município de Juruti



O complexo da Mina de Juruti é composto por:

- Instalações industriais da área de beneficiamento de bauxita, situadas a cerca de 60,0 km da cidade, no centro do platô Capiranga, onde é a primeira área minerada, contendo: área de lavra, britagem, planta de beneficiamento com duas linhas de produção, lagoa de espessamento (LE), lagoas de Disposição (LD's 1 a 7),
- Ferrovia, com aproximadamente 50,0 km de extensão, que transporta o minério de bauxita do platô Capiranga até o Porto.
- Terminal portuário, localizado a 2,0 km da área urbana de Juruti, à margem direita do rio Amazonas.

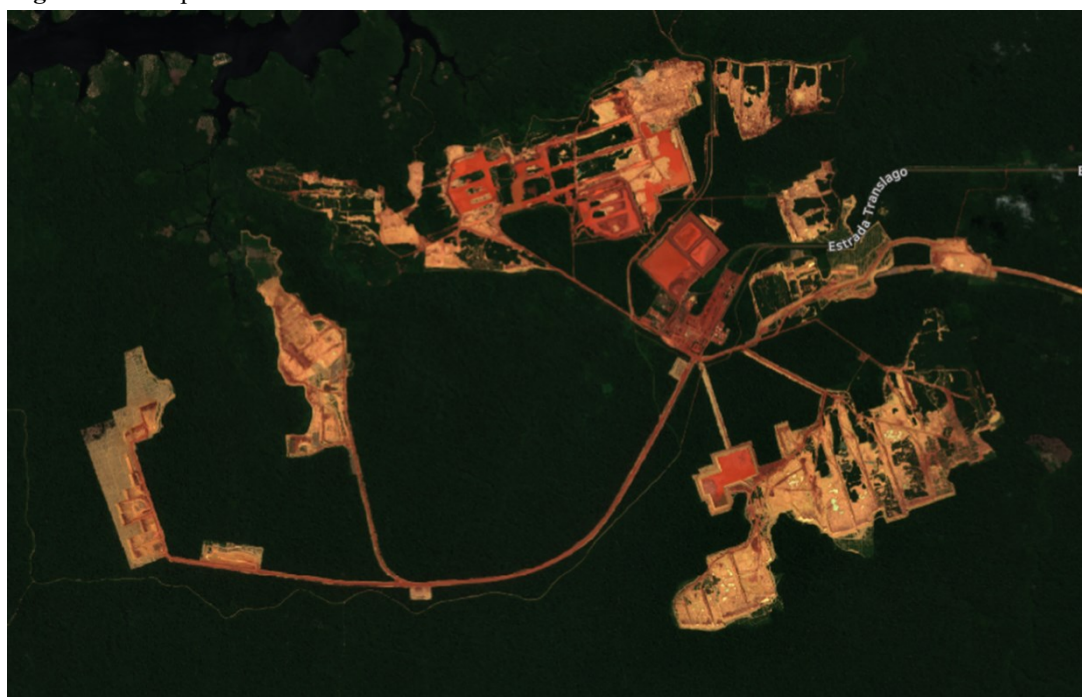
O minério de bauxita no Platô Capiranga encontra-se coberto por uma vegetação densa e uma camada de estéril, com espessura variável, composta de solo orgânico, argila, bauxita nodular e laterita. Para ser lavrada, a bauxita tem que ser decapeada/exposta. Esta operação se faz de forma sequencial, em faixas regulares, onde o estéril de cobertura escavado é depositado na faixa adjacente, na qual o minério foi anteriormente lavrado, chamado de método em tiras.

Da lavra, o minério escavado é transportado até as instalações da Planta de Beneficiamento, onde passa pelos processos de britagem, lavagem, ciclonagem e filtragem. Do processo de beneficiamento resultam em duas saídas:

- Bauxita lavada (produto), que é enviado para os pátios para ser transportado para embarque.
- Argila e água (rejeito), que é transferido para Lagoa de Espessamento e posteriormente transferido via bombeamento para as lagoas de disposição sem nenhuma adição de produto químico.

De maneira geral, a disposição é sequenciada com o recebimento do rejeito da planta pela Lagoa de Espessamento (LE), na forma de polpa que passa por um período de sedimentação e adensamento parcial dos sólidos possibilitando a separação da água sobrenadante que é bombeada para alimentar o circuito de água de processo da lavagem da planta. Após o período de espessamento, o rejeito decantado na LE é dragado e conduzido para as Lagoas de Disposição (LD's), após o adensamento do rejeito a água sobrenadante é liberada e bombeada de volta para a LE para ser utilizada no circuito de água de processo, através da recirculação dela. A organização das estruturas da Mina de Bauxita de Juruti é ilustrada na Figura 6.

Figura 6 - Complexo da Mina de Bauxita de Juruti.



Fonte: Sentinel Hub, 2023.

3.2 Caracterização do rejeito

3.2.1 Seleção da Amostra

Foi solicitado via e-mail para o setor de Relações Institucionais da Mina de Juruti, solicitando amostras do rejeito. A metodologia adotada para a coleta é descrita abaixo.

Os rejeitos, utilizados no estudo, foram extraídos de “lagoas” de contenção da mineradora Alcoa, a partir da indicação da equipe de engenharia da área no qual através de estudos internos nos indicaram as granulometrias propícias para realização desse estudo. Dessa forma, como mostra a Figura 7. Onde o Rejeito “A”, foi extraído uma amostra de 150kg da Lagoa de Espessamento (LE) e o Rejeito “B”, foi extraído uma amostra de 150kg da Lagoa de Disposição 03 (LD3), considerando 60 cm. O período de coleta foi definido considerando o verão na região amazônica, dessa forma estabeleceu-se o mês de novembro de 2022.

Figura 7 - Lagoas: a) Rejeito “A” - LE b) Rejeito “B” - LD3



(a)

(b)

Fonte: Arquivo do autor, 2023.

As amostras utilizadas nos ensaios foram preparadas de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016) que trata da preparação de amostras de solos para ensaios de compactação e caracterização.

Para a realização dos ensaios de caracterização dos rejeitos, foi realizado também testes adicionais a partir das misturas entre os materiais coletados (rejeito A e rejeito B), como mostra o Quadro 5. Essa solicitação se deu ao observar em campo que visualmente o rejeito da LE era mais arenoso que o rejeito da LD3, dessa forma a nível de exploração foi solicitado os dois traços entre eles para que houvesse um maior panorama de resultados buscando atender os parâmetros são recomendados para caracterizar o solo a ser utilizado na produção dos tijolos de solo cimento ABNT NBR 10833 (2013).

Quadro 5 - Amostras.

Amostra	Origem	Traço (LE:LD3)
Rejeito A	LE	1
Rejeito B	LD3	1
Rejeito C	LE e LD3	1:1
Rejeito D	LE e LD3	1:2

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Os ensaios apresentados no Quadro 6, são utilizados para a caracterização física do rejeito, uma vez que, por meio deles se conhece a sua natureza e propriedades mecânicas, sendo possível assim, avaliar se eles atendem aos requisitos da NBR 8491 (ABNT, 2012b).

Quadro 6 - Normas para caracterização do solo.

Propriedades	Norma
Análise granulométrica	ABNT NBR 7181/2018
Limite de liquidez	ABNT NBR 6459/2016
Limite de plasticidade	ABNT NBR 7180/2016
Compactação	ABNT NBR 7182/2016

Fonte Elaborado pelo autor, 2023.

Vale ressaltar que, todas as amostras dos ensaios mencionados foram preparadas de acordo com a NBR 6457 (ABNT, 2016a) que aborda a quantidade e modo de preparação do solo para cada ensaio.

3.2.2 Ensaio Granulométrico

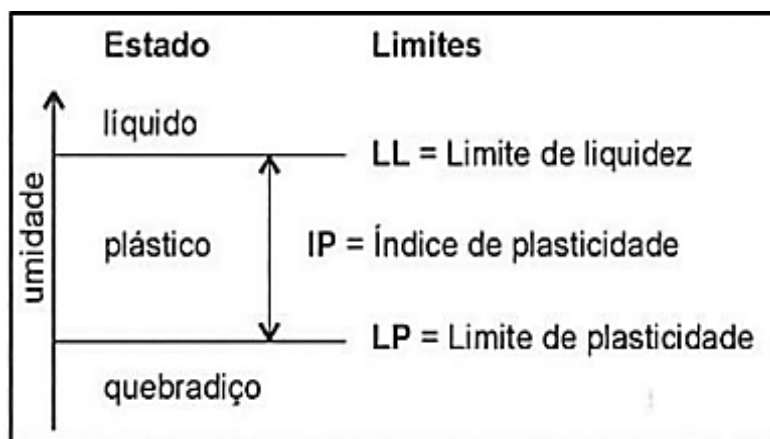
Regulamentado pela ABNT 7181/2018, o ensaio de granulometria é o procedimento utilizado para a determinação da porcentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de partículas representa na massa total ensaiada. Por meio dos resultados obtidos desse ensaio, constrói-se a curva de distribuição granulométrica, empregada na classificação dos solos. A determinação da granulometria de um solo pode ser feita apenas por peneiramento ou por peneiramento e sedimentação.

3.2.3 Limites de Atterberg

Limites de plasticidade (LP) - ABNT NBR 6459/2016 e limite de liquidez (LL) - ABNT NBR 7180/2016, conhecidos como Limites de Atterberg, os solos podem apresentar diferentes tipos de consistência a depender da quantidade de umidade que possuam. Essa consistência pode ser sólida, semissólida, plástica ou a de um fluido denso. Quando muito úmido se compara a líquidos, quando perde parte de sua água se torna plástico, e quando seco

se torna quebradiço (PINTO, 2000). A diferença entre o valor do LL e do LP é chamada de índice de plasticidade (IP), e indica a faixa em que o solo se apresenta plástico, conforme a Figura 8.

Figura 8 – Limites de Atterberg.



Fonte: Pinto, 2006.

3.2.4 Ensaio de Compactação

O ensaio de compactação consiste no processo mecânico que, através de uma aplicação repetida e rápida de cargas ao solo, conduz a uma diminuição do seu volume, portanto, a uma diminuição do índice de vazios e a um aumento do peso volúmico seco. Esta redução de volume é resultado, sobretudo, da expulsão de ar dos vazios do solo, não ocorrendo significativa alteração do teor em água nem alteração do volume das partículas sólidas durante a compactação.

3.3 Cimento Portland

Foi utilizado o cimento Portland composto com material carbonático (CP II F - 32), as propriedades e os limites da composição do cimento atendem as exigências da norma NBR 16697 (ABNT, 2018), que trata dos requisitos de cada tipo de cimento e, assim, estando apto para produção de tijolos ecológicos.

3.4 Fabricação Tijolo Ecológico

Com o objetivo de avaliar preliminarmente a aplicabilidade do rejeito na modelagem dos tijolos ecológicos, foi produzido 10 tijolos substituindo o solo natural pelo rejeito do minério de bauxita. Foram utilizados 10% de cimento referentes à proporção em rejeito, com isso, o traço estabelecido é de 1: 10 (relação cimento-rejeito). Segundo Barbosa e Dias (2017),

o método de fabricação dos tijolos ecológicos é muito simples, pois, realiza-se o processo de homogeneização e prensagem. Foram realizadas as seguintes etapas:

- Primeiro, adicionou-se o cimento e o resíduo, destorroado e peneirado na peneira 4,8 mm, os materiais que o compõe são medidos por um recipiente de 12 litros (Figura 9).

Figura 9 – Material peneirado.



Fonte: Arquivo do autor, 2023.

- Preparação da mistura: foram adicionados o rejeito e o cimento (Figura 10a) posteriormente foi realizada a homogeneização manual dos materiais secos (Figura 10b) em seguida, adicionou-se água para a execução da mistura até todas as partes da amostra estarem úmidas uniformemente. Esta última etapa, é importante para o processo pois é quando se obtém o ponto de umidade ótimo para dá coesão ao tijolo quando estiver na prensa. (Figura 10c);

Figura 10 – Mistura e umidade.



(a)

(b)

(c)

Fonte: Arquivo do autor, 2023.

- Moldagem dos tijolos: No processo de moldagem, a mistura foi colocada numa prensa semianual hidráulica da marca ECOMAQUINAS para molde e prensagem (Figura 11). Os tijolos foram retirados da prensa e colocados em uma superfície plana para aguardar o tempo de cura, sendo produzido 10 tijolos ecológicos.

Figura 11 – Prensa semianual (hidráulica).



Fonte: ECOMAQUINAS (2022).

- Cura e armazenamento: Aos sete primeiros dias, os tijolos foram mantidos úmidos sendo regados três vezes ao dia e armazenados em área coberta. A Figura 12, mostra o processo de cura dos tijolos.

Figura 12 - Cura dos tijolos ecológicos.



Fonte: Arquivo do autor, 2023.

O método de confecção dos tijolos ecológicos seguiu os requisitos da Norma ABNT 10833 (2012), que trata especificamente sobre sua fabricação.

4 RESULTADOS E ANÁLISES

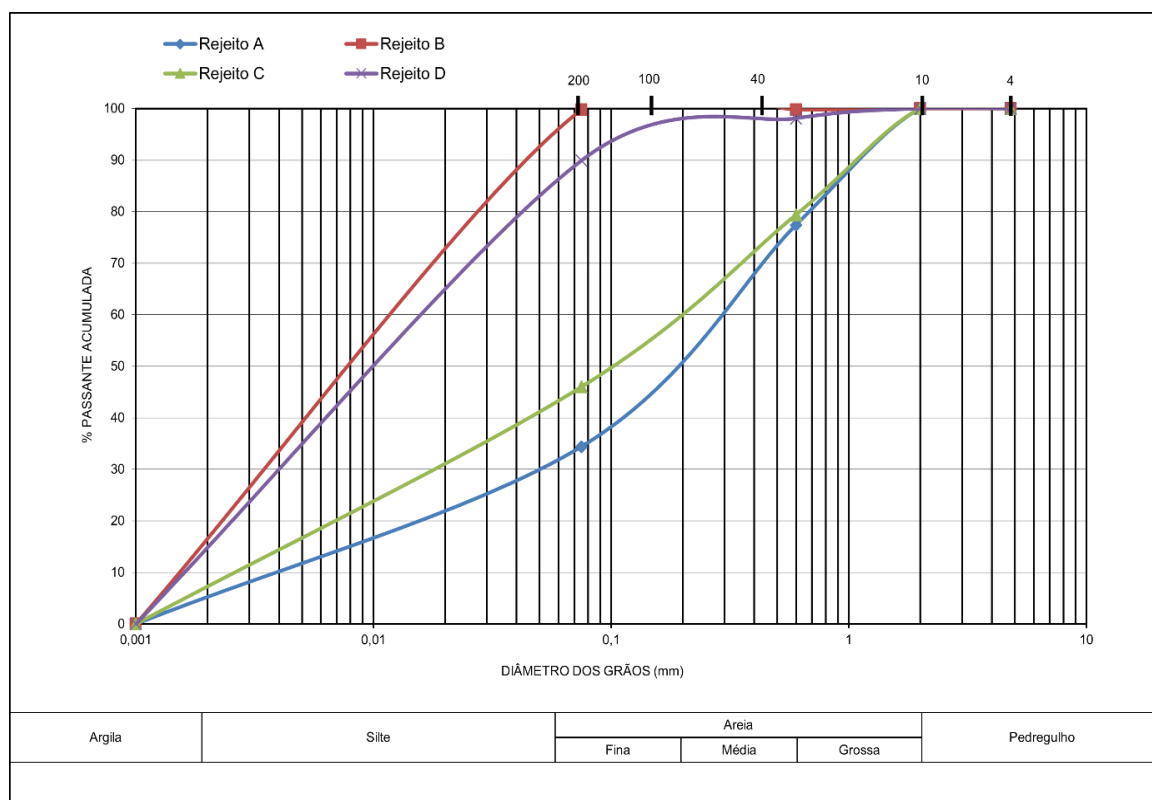
4.1 Caracterização do Rejeito

Contendo os resultados dos processos experimentais realizados, este capítulo detém-se as suas respectivas análises e discussões referentes às características das amostras dos rejeitos que atenderam requisitos mínimos dos ensaios.

4.1.1 Análise Granulométrica

A partir do ensaio granulométrico por peneiramento (ABNT NBR 7181/2018), foi determinada a distribuição dos diâmetros de grãos e suas respectivas porcentagens de solo em cada faixa específica de tamanho. O Gráfico 1, apresenta a curva granulométrica dos solos analisados.

Gráfico 1 - Curvas granulométricas.



Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

De acordo com as curvas granulométricas apresentadas no Gráfico 1, foi possível realizar a análise granulométrica, como mostra a Tabela 1, tendo as seguintes porcentagens de argila, silte e areia nas amostras dos rejeitos. Dessa forma as amostras A e C têm características

arenosas acima de 50%, atendendo aos requisitos mínimos de granulometria para a composição dos tijolos solo cimento.

Tabela 1 - Análise Granulométrica.

Amostra	Rejeito A	Rejeito B	Rejeito C	Rejeito D
Argila + Silte	34,5%	98%	46%	72%
Areia	65,6%	2%	54%	28%

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

4.1.2 Limites de Atterberg

Os dados obtidos nos ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade estão expostos na Tabela 2.

Tabela 2 - Limites de Consistência e Índice de Plasticidade.

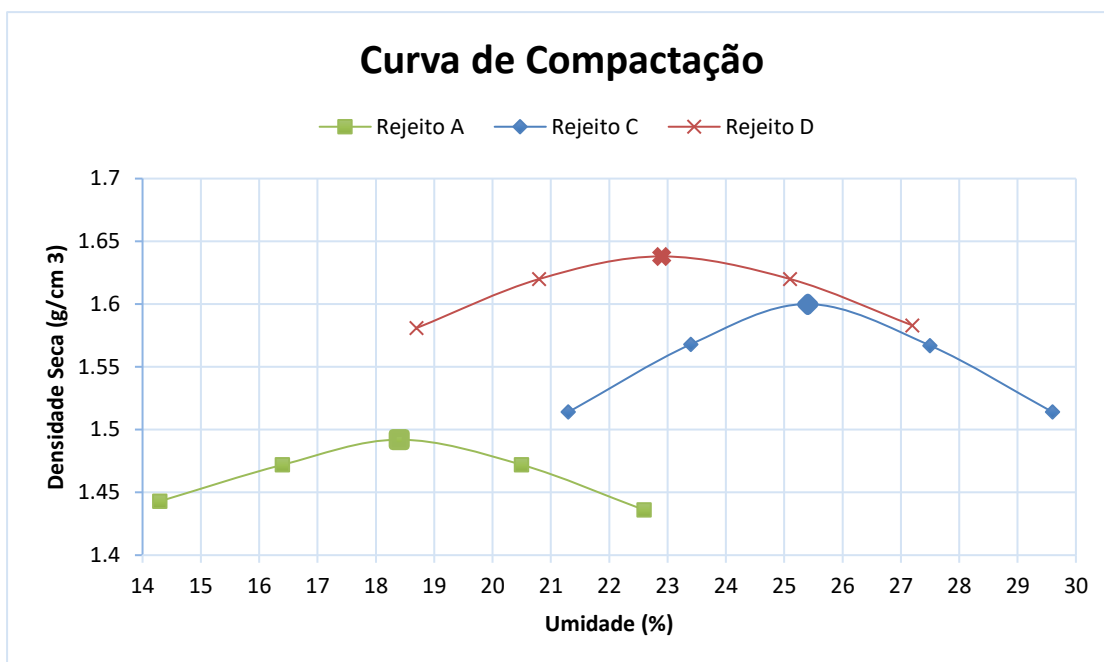
Parâmetro	Rejeito A	Rejeito B	Rejeito C	Rejeito D	ABNT NBR 10833/2012
Limite de Liquidez (LL)	-	60,9	38,4	49,4	Máximo 45%
Limite de Plasticidade (LP)	-	32,7	23,6	25,4	-
Índice de Plasticidade (IP)	-	28	14,6	23,9	Máximo 18%

Fonte: : Elaborado pelo autor, 2023.

De acordo com autores Alcântara (2010) e Neves (2011), solos com altos Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade são difíceis de se estabilizar com cimento. A recomendação dos autores é de que o solo apresente $LL \leq 45\%$ e $IP \leq 18\%$, dessa forma apenas a “Amostra C”, cumpriu os requisitos.

4.1.3 Compactação

No intuito de analisar o comportamento dos solos com relação às ações de compactação com e o teor de umidade acrescido a eles, realizou-se tal ensaio, podendo mensurar a umidade ótima e a densidade máxima seca dos mesmos. A seguir os gráficos apresentam as curvas dos ensaios de compactação e a Tabela 3 apresenta os respectivos resultados.

Gráfico 2 - Curvas de compactação.

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios de compactação.

Parâmetro	Rejeito A	Rejeito B	Rejeito C	Rejeito D
Massa específica seca máxima (g/cm ³)	1,49	-	1,60	1,63
Teor de Umidade Ótimo (%)	18,4	-	25,4	22,9

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Através do ensaio de compactação, ABNT NBR 7182/2016. Foi possível verificar que as amostras D e C, que conforme também o ensaio de granulometria possui mais finos, sendo fundamental aumentar a quantidade de água necessária para que a mistura alcance sua umidade ótima de compactação, determinando assim a deformação da amostra resultando na massa específica seca máxima. Este fato se deve à grande absorção de água do resíduo. A amostra B, não obteve resultado por ter sua formação ser constituída totalmente de finos como demonstrado também no ensaio de granulometria.

A amostras A, necessitou de uma menor quantidade de água, devido à menor área superficial específica da areia. O que está em conformidade com o que diz Grande (2003), que relata que quanto maior a quantidade de solos finos em uma amostra, mais elevados serão os teores de água para atingir a umidade ótima, devido à maior área superficial do solo.

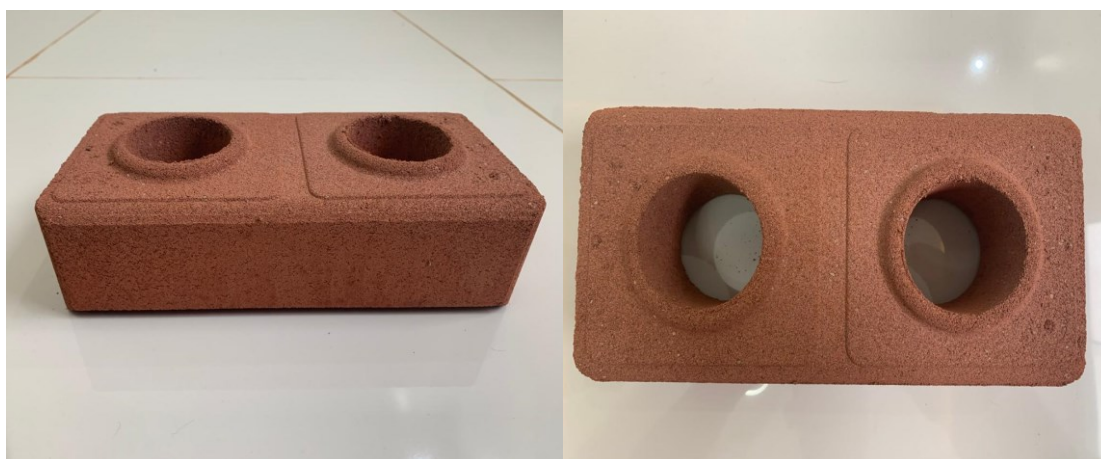
4.2 Tijolo Ecológico

4.2.1 Fabricação

De acordo com os resultados obtidos com os testes de caracterização física (Análise Granulométrica, Limites de Atterberg e Compactação), constou-se que a amostra C atendeu os parâmetros mínimos exigidos pela Norma ABNT 10833 (2012) que determina os requisitos para a fabricação de tijolos solo cimento.

Dessa forma foi possível realizar uma análise preliminar referente a confecção dos tijolos, conforme mostra a Figura 13. Obteve-se um resultado aceitável no modelamento e prensagem da peça, também respeitando o tempo de cura umedecendo-o durante os sete primeiros dias de produzido. Entretanto ao final do processo, o tijolo apresentava em sua superfície um aspecto ligeiramente friável ao toque, mas de maneira geral bem compactado.

Figura 13 – Tijolo ecológico – Amostra C.



Fonte: Arquivo do autor, 2023.

4.2.2 Dimensionamento

Os valores correspondentes à análise dimensional dos tijolos confeccionados com a amostra C (traço na proporção 1:1) estão apresentados na Tabela 4 e os respectivos desvios padrões na Tabela 5. Os tijolos foram produzidos atendendo as dimensões de 75 mm de altura, 250 mm de comprimento e 125 mm de largura, atendendo a tolerância de discrepância de ± 3 mm aceitos pela Norma ABNT 8491 (2012).

Tabela 4 - Análise dimensional dos tijolos.

Tijolo	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)
1	75,18	250,02	126,82
2	75,88	251,57	125,96
3	76,99	250,25	127,26
4	75,95	252,22	125,59
5	75,87	252,83	127,28
6	76,25	251,51	126,37
7	75,82	252,62	127,44
8	77,31	252,99	125,36
9	75,81	250,93	124,88
10	75,17	249,66	126,58

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

Tabela 5 - Desvio padrão dos tijolos.

	Altura (mm)	Comprimento (mm)	Largura (mm)
Desvio padrão (mm)	0,684511992	1,211711	0,883543371

Fonte: Elaborado pelo autor, 2023.

5 CONCLUSÃO

Os resultados dos processos comparativos dos ensaios das amostras de rejeito coletadas, foram analisados avaliando os critérios norteadores usados como parâmetros que estão presentes na ABNT NBR 10833, 2012. Com o objetivo de validar o uso do rejeito como alternativa para a produção dos tijolos solo cimento.

Pelos resultados analisados, pode-se concluir que a amostra “C” que tem em sua mistura a proporção de 1:1 (LE:LD3) atendeu as exigências mínimas das normativas para fabricação de tijolos ecológicos. Entretanto, os resultados foram próximos ao limite mínimo das faixas granulométricas arenosas, com grande quantidade de finos. Ainda assim, proporcionou uma mistura plástica aceitável, comprovada pelo índice de plasticidade dentro dos limites.

As demais amostras do rejeito A, B e D não atenderam aos requisitos físicos e obtiveram valores acima do permitido ou não deram condições mínimas para a realização completa dos ensaios propostos nesse estudo.

Portanto, é possível afirmar que há características físicas viáveis para a fabricação de tijolos de solo cimento com a substituição total do solo por rejeito de bauxita seguindo a mistura da amostra C, tendo um complemento necessário entre a Lagoa de Espessamento e a Lagoa de Disposição 03 para a formulação do traço 1:1. Entretanto devem passar pelos ensaios de absorção de água e resistência a compressão uniaxial, para de fato serem considerados tijolos de solo cimento pela ABNT.

6 RECOMENDAÇÕES

Para futuros trabalhos relacionados a fabricação de tijolos de solo cimento com utilização do rejeito de bauxita, seguem algumas recomendações:

- Efetuar ensaio de determinação da resistência à compressão e absorção de água dos tijolos fabricados;
- Avaliação da incorporação do solo com o rejeito de bauxita na mistura solo cimento;
- Realizar ensaio de caracterização química;
- Análise econômica e ambiental entre tijolos cerâmicos e tijolos de solo cimento;
- Construir protótipos em alvenaria utilizando blocos de solo cimento incorporados com rejeito de bauxita, para verificar as condições de construção e o estudo sobre o conforto térmico e acústico.

REFERÊNCIAS

ABREU, L. **Métodos de Lavra**. 2010. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAATfwAF/metodos-lavra>. Acesso em: 20 dez. 2022.

Arhin D. D. Fabrication and characterisation of ghanaiian bauxite red mud-clay composite bricks for construction applications. **American Journal of Materials Science**, v. 3, n. 5, p. 110-119, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Bauxita no Brasil**. Associação Brasileira do Alumínio. São Paulo: ABAL, 2017. Disponível em: https://www.abal.org.br/downloads/ABAL_Relatorio_Bauxita_2017_1.pdf. Acesso em: 21 dez. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO ALUMÍNIO. **Alumínio cadeia Primária**. São Paulo: ABAL, 2022. Disponível em: <https://abal.org.br/aluminio/cadeia-primaria/>. Acesso em: 21 dez. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia básico de utilização do cimento portland**. 7. ed. São Paulo, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8492: **Tijolo maciço de solo cimento — análise dimensional — determinação da resistência à compressão e da absorção de água – Método de ensaio**. Rio de Janeiro: ABNT, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8492**: tijolo de solo cimento: análise dimensional, determinação da resistência à compressão e da absorção de água: método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

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

ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10834**: bloco vazado de solo cimento sem função estrutural: requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2012.

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

ARMSTRONG, M. *et al.* Accounting for tailings dam failures in the valuation of mining projects. **Resources Policy**, [s. l.], v. 63, n. May, p. 101461, 2019.

BABISK, M. P. **Incorporação de lama vermelha em cerâmica vermelha**. 2015. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Ciência dos Materiais) - Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Centro de Ciência e Tecnologia, Campos dos Goytacazes, 2015.

BORBA, S. C. *et al.* Avaliação das propriedades mecânicas de tijolos solo cimento formulados com refugo do mesmo e escória de aciaria. In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, 21., 2014, Cuiabá. **Anais [...]**. Cuiabá: CBECIMAT, 2014.

BRUSCHI, G. J. **Estabilização de rejeitos de mineração de bauxita por meio de um sistema ligante álcali-ativado de cinza do bagaço de cana-de-açúcar e cal de carbureto**. 2020. 184 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2020.

CAMPOS, I. M. **Solo cimento, solução para economia e sustentabilidade**. [S.I.]: IBDA, 2008. Disponível em: <http://www.forumdaconstrucao.com.br/conteudo.php?a=23&Cod=124>. Acesso em: 20 dez. 2022.

COSTA, L. F. **Utilização de rejeito de minério de ferro na formulação de tijolos ecológicos**. 2021. 32 f. Monografia (especialização em Gestão Estratégica de Negócios) – Universidade Federal de Minas Gerais, Centro de Pós-Graduação e Pesquisas em Administração, Belo Horizonte, 2021.

ECO PRODUÇÃO TIJOLOS ECOLÓGICOS. **Tijolo Ecológico Modular – Manual Prático: Vantagens técnicas, benefícios financeiros, composição e aplicação na construção**. Curitiba: Eco Produção Tijolos Ecológicos, 2010. Disponível em: <http://www.ecoproducao.com.br/downloads/cartilha-eco-producao.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2022.

GOMES, L. E. de O. *et al.* The impacts of the Samarco mine tailing spill on the Rio Doce estuary, Eastern Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, [s. l.], v. 120, n. 12, p. 2836, 2017.

HOLANDA, R. M.; SILVA, B. B. Cerâmica Vermelha–Desperdício na Construção Versus Recurso Natural Não Renovável: Estudo de Caso nos Municípios de Paudalho/PE e Recife/PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 4, n. 4, p. 872-890, 2012.

HUA, Y.; HEAL, K. V.; FRIESL-HANL, W. The use of red mud as an immobiliser for metal/metalloid-contaminated soil: A review. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], v. 325, p. 17-30, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Setor mineral: valores de produção, de exportações e de tributos quase dobram no 1º semestre de 2021**. [S.I.]: IBRAM, 2021. Disponível em: <https://ibram.org.br/noticia/setor-mineral-valores-de-producao-de-exportacoes-e-de-tributos-quase-dobram-no-1o-semester-de-2021/>. Acesso em: 20 dez. 2022.

FARIAS, C. E. G. **Mineração e Meio Ambiente no Brasil**. Brasília: CGEE, 2002. 42 p. GRUPO VISION. **Beneficiamento de minério de ferro**. [S.I.]: Grupo Vision, 2017. Disponível em: <http://www.grupovision.com.br/areas-de-atuacao/mineracao/extracao-do-minerio-deferro/beneficiamento-de-minerio-de-ferro/>. Acesso em: 20 dez. 2022.

LIMA, M. T. **Regeneração natural nas pilhas de estéril em mineração de calcário, Salto de Pirapora, SP**. 2016. Dissertação (Mestrado em Sustentabilidade na Gestão Ambiental) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2016.

LIRA, D. S. **Tijolos ecológicos: estudo de viabilidade técnica no uso de agregados reciclados de resíduos da construção civil classe A**. 2020. 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciências, Tecnologia e Sociedade) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2020.

LOPES, M. **Métodos de Lavra a Céu Aberto**. [S.I.]: Técnico e Mineração, 2015. Disponível em: <https://tecnicoeminerao.com.br/metodos-de-lavra-a-ceu-aberto/>. Acesso em 20 dez. 2022.

LOZANO, F. A. E. **Seleção de Locais para Barragens de Rejeitos Usando o Método de Análise Hierárquica**. 2006. 142 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

LOUZADA, B. B. **Aplicação de rejeito de mineração da bauxita na produção de tijolos cerâmicos**. In: Congresso Anual da ABM, 74., 2019, São Paulo. Anais [...]. São Paulo: ABM Proceedings, 2019.

LUMBROSO, D. *et al.* The potential to reduce the risks posed by tailings dams using satellite-based information. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, [s. l.], v. 38, n. March, p. 101-209, 2019.

MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. On the production of fired clay bricks from waste materials: A critical update. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 599-610, 2014.

NASCIMENTO, A. C. S. **Tijolo solo cimento com adição de rejeito de manganês do sudeste paraense**. 2015. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Pará, 2015.

NATH, H.; SAHOO, P.; SAHOO, A. Characterization of Red Mud treated under high temperature fluidization. **Powder Technology**, [s. l.], v. 269, p. 233-239, 2015.

PEDROSO, D. E. **Aproveitamento do rejeito de minério de ferro em compósitos para construção civil**. 2020. 115 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2020.

PINTO, L. M. **Estudo de tijolos de solo cimento com adição de resíduo de construção civil**. 2015. 59 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenheiro Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Departamento de Estruturas e Construção Civil, Santa Maria, 2015.

PISANI, J. M. **Um material de construção de baixo impacto ambiental: o tijolo de solo cimento**. São Paulo: Sinergia, 2007.

QUARESMA, L. F. **Perfil da Mineração de Bauxita**. Minas Gerais: MME, 2009.

Disponível em:

http://antigo.mme.gov.br/documents/36108/448620/P11_RT22_Perfil_da_Minerao_de_Bauxita.pdf/399bb52a-90df-5b2a-e634-b06ecb1e3008?version=1.0. Acesso em: 21 dez. 2022.

RODRIGUES, O. M. S. **Flotação de caulinita em minérios de ferro e bauxítico**. 2012. 170 f. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas) – Universidade Federal de Minas Gerais, Minas Gerais, 2012.

SANTIAGO, R. **Mineração brasileira receberá US\$ 38,5 bilhões em investimentos e irá gerar mais empregos até 2025**. [S.I.]: Mineração Brasil, 2021. Disponível em: <https://>

mineracaobrasil.com/mineracao-brasileira-recebera-us-385-bilhoes-em-investimentos-e-iragerar-mais-empregos-ate-2025/. Acesso em: 17 dez. 2022.

SILVA, J. R. G. **Avaliação experimental de tijolos ecológicos visando sua aplicação em construções sustentáveis**. 2018. 29 f. Trabalho Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2018.

SILVA, L. C. R. S. **Barragens de rejeitos na indústria mineral brasileira**. 2017. 41 f. Monografia (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

SOUZA, C. C.; VIEIRA, C. M. F.; MONTEIRO, S. N. Alterações microestruturais de cerâmica argilosa incorporada com rejeito de minério de ferro. **Revista matéria**, Rio de Janeiro, v. 13, n. 1, p. 194-202, 2008.

Souza, M. I. B. **Análise da adição de resíduos de concreto em tijolos prensados de solo cimento**. 2006. 117 f. Dissertação (Mestrado e em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2006.