



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

**WESLEY FARIAS TEIXEIRA**

**ANÁLISE PRELIMINAR DE VIABILIDADE DO PROCESSO DE CONSOLIDAÇÃO  
MECÂNICA ACELERADA EM REJEITO DE BAUXITA DE UMA MINA EM  
JURUTI -PA**

**JURUTI – PA**

**2024**

**WESLEY FARIAS TEIXEIRA**

**ANÁLISE PRELIMINAR DE VIABILIDADE DO PROCESSO DE CONSOLIDAÇÃO  
MECÂNICA ACELERADA EM REJEITO DE BAUXITA DE UMA MINA EM  
JURUTI -PA**

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: Prof. Me. Alan Anderson de Arruda Tino

**JURUTI – PA  
2024**

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

---

- T266a Teixeira, Wesley Farias  
Análise preliminar de viabilidade do processo de consolidação mecânica acelerada em rejeito de bauxita de uma mina em Juruti - PA./ Wesley Farias Teixeira. – Juruti, 2024.  
51 p.: il.  
Inclui bibliografias.
- Orientador: Alan Anderson de Arruda Tino.  
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Campus Universitário de Juruti, Bacharelado em Engenharia de Minas.
1. Gerenciamento do rejeito. 2. Sedimentação. 3. Recuperação de água. I. Tino, Alan Anderson de Arruda, *orient.* II. Título.

CDD: 23 ed. 622

**WESLEY FARIAS TEIXEIRA**

**ANÁLISE PRELIMINAR DE VIABILIDADE DO PROCESSO DE CONSOLIDAÇÃO  
MECÂNICA ACELERADA EM REJEITO DE BAUXITA DE UMA MINA EM  
JURUTI -PA**

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: Prof. Me. Alan Anderson de Arruda Tino

Conceito: 9.0

Data de aprovação: 24/09/2024



Prof. Me. Alan Anderson de Arruda Tino (Orientador)  
Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA



Documento assinado digitalmente  
ANTONIO MARCIO AVILA ALMEIDA  
Data: 08/10/2024 21:45:07-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Antônio Marcio Ávila Almeida  
Universidade Federal do Oeste do Pará



Documento assinado digitalmente  
REGIS QUESADA CASQUET  
Data: 09/10/2024 06:59:49-0300  
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Me. Regis Quesada Casquet  
Universidade Federal do Oeste do Pará

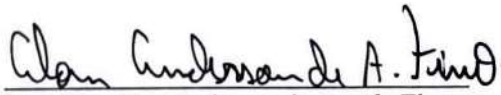


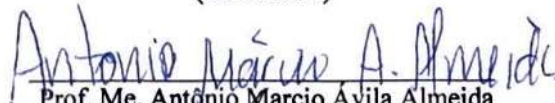
UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DO PARÁ  
CAMPUS UNIVERSITÁRIO DE JURUTI  
CURSO DE BACHARELADO EM ENGENHARIA DE MINAS

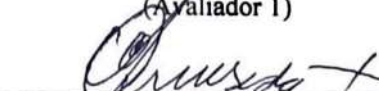
**ATA DA DEFESA DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

No dia 24 de setembro do ano de dois mil e vinte quatro, na sala 02, do Campus Universitário de Juruti, da Universidade Federal do Oeste do Pará, às 19:03 horas, reuniu-se a Banca Avaliadora de TCC composta pelo Prof., Me. Alan Tino (orientador e presidente da banca), Prof., Me. Márcio Almeida e Prof., Me. Regis Casquet. A reunião teve por objetivo avaliar o trabalho de conclusão de curso de Bacharelado em Engenharia de Minas do discente **WESLEY FARIAS TEIXEIRA** sob o título: ANÁLISE PRELIMINAR DA VIABILIDADE DO PROCESSO DE CONSOLIDAÇÃO MECÂNICA ACELERADA EM REJEITO DE BAUXITA DE UMA MINA EM JURUTI -PA O trabalho foi aberto pelo orientador. Cada examinador arguiu o estudante, com tempos iguais de perguntas e respostas. Terminadas as arguições, procedeu-se o julgamento do trabalho, concluindo a Banca Avaliadora que o discente está ( APROVADO ( ) REPROVADO, com nota 9,0 Nada mais havendo a tratar, foi a presente ata lavrada por mim, Alan Anderson de Arruda Tino, que vai assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Juruti, 24 de setembro de 2024

  
Prof. Me. Alan Anderson de Arruda Tino  
(Orientador)

  
Prof. Me. Antônio Marcio Ávila Almeida  
(Avaliador 1)

  
Prof. Me. Regis Quesada Casquet  
(Avaliador 2)

Dedico este trabalho aos meus pais, Aldenise Teixeira Farias e Wender de Souza Teixeira, em reconhecimento ao apoio, carinho e incentivo incondicionais.

## **AGRADECIMENTOS**

Gostaria de expressar minha sincera gratidão a todos que contribuíram para a realização deste trabalho.

Primeiramente, agradeço aos meus pais, Aldenise Teixeira Farias e Wender de Souza Teixeira, pelo apoio incondicional, carinho e incentivo constantes durante toda a minha jornada acadêmica. Sem o apoio e compreensão de vocês, este trabalho não teria sido possível.

Agradeço também ao meu orientador, Alan Anderson de Arruda Tino, pela orientação valiosa, pelos ensinamentos e pela paciência ao longo deste processo. Suas contribuições foram fundamentais para o desenvolvimento e a qualidade deste trabalho.

Aos meus colegas e amigos, Carla Fernanda de Lima Pereira, Lecheane Pereira da Silva, Ronaldo Souza dos Santos e Wilk Guimarães das Graças expresso minha profunda gratidão pelo apoio e cumplicidade mútua ao longo de toda a graduação.

Agradeço igualmente à Universidade Federal do Oeste do Pará, pelos recursos e pelo ambiente acadêmico propício ao desenvolvimento do trabalho.

Aos docentes do Curso de Engenharia de Minas, expresso meu respeito e gratidão pelas orientações e ensinamentos concedidos.

Finalmente, expresso minha gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste TCC.

“Quando a maldade aqui passou  
E a tristeza fez abrigo  
Luz lá do céu me visitou  
E fez morada em mim  
Quando o medo se apossou  
Trazendo guerras sem sentido  
A esperança aqui ficou  
Segue vibrando e me fez lutar, para vencer”

*Isabela Cristina Correia de Lima*

## RESUMO

Um dos principais desafios enfrentados pelas empresas de mineração atualmente é a busca pelo desenvolvimento harmonioso entre eficiência operacional e preservação ambiental. A crescente mobilização em torno de novos processos baseados nos princípios de economia circular e sustentabilidade tem incentivado o desenvolvimento e a aplicação de novas técnicas de manejo de rejeito de bauxita. A presente pesquisa busca reproduzir o processo de sedimentação de rejeito de bauxita em laboratório, com o objetivo de analisar a água retida na camada de rejeito espessado. Adicionalmente, o estudo visa avaliar a eficácia e a viabilidade do método de Consolidação Mecânica Acelerada (*accelerated mechanical consolidation-AMC*) para a gestão e tratamento de rejeitos de bauxita, através da construção de um protótipo de simulação em ambiente laboratorial. Com relação a sedimentação, foi simulado em provetas polpas de diferentes concentrações (6%, 9%, 12% e 20%). Os resultados indicaram uma média de 42,64% de sólidos em massa na camada de material sedimentado. Para a recuperação da água retida no rejeito adensado, o estudo focou na aplicação da AMC em polpas com diferentes concentrações de sólidos (30%, 40%, 50% e 60%), observando a eficiência na recuperação de água e o aumento da concentração de sólidos na polpa. Os resultados indicam que a AMC é eficaz na recuperação de água retida e no aumento da concentração de sólidos, com uma recuperação de cerca de 20% da água em polpas com 30% de sólidos, oferecendo uma alternativa eficiente ao gerenciamento de rejeitos. Nas polpas com concentrações superiores a 50% a aplicação do AMC foi desfavorável devido ao baixo percentual de água recuperada. O estudo preliminar conclui que a consolidação mecânica acelerada se apresenta como uma alternativa para o tratamento de rejeitos de bauxita, com potencial para otimizar o processo de desaguamento e reduzir os impactos ambientais associados à disposição de rejeitos.

**Palavras-Chave:** Gerenciamento de rejeito, Sedimentação, Recuperação de água, Sustentabilidade.

## ABSTRACT

One of the main challenges facing mining companies today is the search for harmonious development between operational efficiency and environmental preservation. The growing mobilization around new processes based on the principles of circular economy and sustainability has encouraged the development and application of new techniques for handling bauxite tailings. This research seeks to reproduce the bauxite tailings sedimentation process in the laboratory, with the aim of analyzing the water retained in the thickened tailings layer. In addition, the study aims to evaluate the effectiveness and viability of the Accelerated Mechanical Consolidation (AMC) method for the management and treatment of bauxite tailings, by building a simulation prototype in a laboratory environment. With regard to sedimentation, slurries of different concentrations (6%, 9%, 12% and 20%) were simulated in test specimens. The results indicated an average of 42,64% solids by mass in the layer of sedimented material. In order to recover this water, the study focused on the application of AMC to pulps with different solids concentrations (30%, 40%, 50% and 60%), observing the efficiency of water recovery and the increase in the concentration of solids in the pulp. The results indicate that AMC is effective in recovering retained water and the concentration of solids, with a recovery of around 20% of the water in pulps with 30% solids, offering an efficient alternative to tailings management. Pulps with concentrations above 50% showed an unfavorable ratio due to the low percentage of water recovered (<1%). The preliminary study concludes that accelerated mechanical consolidation is an alternative for treating bauxite tailings, with the potential to optimize the dewatering process and reduce the environmental impacts associated with tailings disposal.

**Keywords:** Tailings management, Sedimentation, Water recovery, Sustainability.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 01 – Perfil litológico do minério de bauxita.....	19
Figura 02 - Método de lavra em tiras. ....	21
Figura 03 - Mapa de localização do município de Juruti (Pará-Brasil).....	22
Figura 04 - Fluxograma de disposição de rejeito sequenciado.....	24
Figura 05 – Máquina de propulsão por parafuso e flutuante MudMaster - Phibion. ....	27
Figura 06 – Rejeito de bauxita consolidado. ....	28
Figura 07 - Processo de homogeneização e secagem da amostra: Homogeneização e retirada de porção da amostra (A), Amostra distribuída em camada fina no interior do recipiente plástico (B) e Fração sólida da amostra resultante do processo de evaporação (C) .....	30
Figura 08 - Moinho de bolas SL-34/2P .....	30
Figura 09 - Processo de moagem da amostra: Inserção de bolas no jarro (A), Inserção da amostra no jarro (B), Operação do moinho (C), Retirada das bolas do jarro (D) e Amostra pulverizada (E) .....	31
Figura 10 - Processo Pulverização e peneiramento da amostra: Pulverização da amostra (A e B) e Peneiramento da amostra (C).....	31
Figura 11 - Teoria de Kynch aplicada a ensaio de sedimentação em laboratório. ....	32
Figura 12 - Preparação das polpas para ensaio de sedimentação: Teor de 6% (A1 e B1), Teor de 9% (B e B1), Teor de 12% (C e C1) e Teor de 20% (D e D1) .....	34
Figura 13 - Remoção da água sobrenadante dos ensaios.....	34
Figura 14 - Componentes do sistema: Prensa hidráulica (A), Tubo de PVC (B), Haste de compactação (C), Base de madeira (D), Filtro de papel (E) e Borracha (F) .....	35
Figura 15 - Dimensões do sistema.....	36
Figura 16 - Preparação das polpas para ensaio de consolidação mecânica: Pesagem da fração líquida (A), Pesagem da fração sólida (B), Homogeneização das frações (C) e Inserção no protótipo (D).....	37
Figura 17 - Curva granulométrica da amostra de rejeito de bauxita da mina de Juruti.....	38
Figura 18 - Interface da camada espessada das polpas: Teor de 6% (A1 e B1), Teor de 9% (B e B1), Teor de 12% (C e C1) e Teor de 20% (D e D1) .....	39
Figura 19 – Água retida na camada espessada .....	39
Figura 20 - Curva de sedimentação dos ensaios com diferentes percentuais de sólidos.....	40
Figura 21 - Curva de sedimentação da lagoa de disposição .....	41

Figura 22 - Aplicação de força no sistema para consolidação mecânica do rejeito: Aplicação de 0,25 tf (A), Aplicação de 0,50 tf (B) e Aplicação de 0,75 tf (C).....	42
Figura 23 - AMC x Umidade da polpa.....	43

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 - Faixa granulométrica dos grãos (ABNT-NBR 6502) .....	29
Tabela 02 - Detalhamento de parâmetros das polpas do ensaio de sedimentação. ....	33
Tabela 03 - Detalhamento de parâmetros das polpas do ensaio de consolidação mecânica ....	36
Tabela 04 - Umidade retida na interface espessada nos ensaios de sedimentação .....	41
Tabela 05 - Umidade retida na interface espessada da Lagoa de disposição .....	42

## **LISTA DE SIGLAS**

ABAL	Associação Brasileira de Alumínio
AMC	Accelerated mechanical consolidation
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CJUR	Campus Juruti
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
UFOPA	Universidade Federal do Oeste do Pará

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
<b>1 JUSTIFICATIVA</b> .....	<b>17</b>
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	<b>18</b>
2.1 OBJETIVO GERAL.....	18
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	18
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>19</b>
3.1 MINÉRIO DE BAUXITA.....	19
3.2 MINA DE BAUXITA DE JURUTI .....	21
3.3 REJEITO DE BAUXITA .....	24
3.4 SEDIMENTAÇÃO DE REJEITO DE BAUXITA .....	25
3.5 CONSOLIDAÇÃO MECÂNICA ACELERADA .....	26
<b>4. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA .....	29
4.1.1 Análise granulométrica.....	29
4.2 COLETA E PREPARAÇÃO DA AMOSTRA .....	29
4.3 ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO.....	31
4.4 ENSAIO DE CONSOLIDAÇÃO MECÂNICA ACELERADA .....	35
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>38</b>
5.1 GRANULOMETRIA .....	38
5.2 CURVA DE SEDIMENTAÇÃO .....	38
5.3 APLICAÇÃO DE CONSOLIDAÇÃO MECÂNICA ACELERADA .....	42
<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>47</b>

## INTRODUÇÃO

Devido ao crescimento exponencial da mineração e, concomitantemente do empobrecimento das jazidas à medida que são exploradas, implicando no aumento do volume de material movimentado, faz com que também aumente a necessidade por locais para disposição de seus resíduos (CRUZ, 2023).

A construção de novas barragens para armazenamento de rejeito está cada vez mais complexa e com processos de licenciamento restritivos. Além disso, uma vez estabelecida ela deve ser monitorada pela empresa responsável. Por isso, técnicas para reutilização ou disposição desses resíduos têm-se desenvolvido nos últimos anos (FERREIRA, 2011).

Ao contrário do que acontecia há cerca de vinte anos atrás, a água na mineração deixou de ser considerada um insumo de baixo custo, e passou a ser percebida como elemento de elevado valor agregado devido as leis mais exigentes para o seu uso e outorga, aos impactos advindos de sua eventual contaminação e em função dos balanços hídricos afetados pelas atividades minerais e efeitos climáticos (PEIXOTO, 2012).

Diante disso, empreendimentos minerários têm buscado métodos alternativos para dispor rejeito e reaproveitar ao máximo a água, buscando a forma mais viável diante das limitações impostas e condições possíveis (CRUZ, 2023).

Uma técnica que tem sido usada em alguns casos, nas barragens de rejeito nas minas de bauxita é a consolidação mecânica e a densificação do rejeito (o rejeito de bauxita também é conhecida como “lama vermelha” devido à sua cor), esse processo é conhecido como *mud-farming*. Esta técnica proporciona uma solução mais simples e menos dependente de reagentes químicos, devido as operações serem realizadas por equipamentos de terraplenagem relativamente baratos. Este método pode, portanto, ser benéfico para operações onde o uso de processos e métodos avançados e caros, dependentes de tecnologia, não é viável (WILLAN, 2015).

## 1 JUSTIFICATIVA

Este estudo preliminar busca analisar a técnica de consolidação mecânica acelerada aplicada a rejeitos de bauxita. Como objeto de estudo para a aplicação do processo de consolidação mecânica acelerada, consideramos o seguinte cenário: Após a extração e lavagem da bauxita, a fração fina chamada de rejeito é bombeado na forma de polpa (mistura de água e partículas), com um teor aproximado de 7% de sólidos em massa, para a lagoa de transição. Nesta lagoa, ocorre a separação preliminar dos sólidos e líquidos da polpa por meio de sedimentação e adensamento natural, sob ação da gravidade. Subsequentemente, o rejeito adensado no reservatório de transição é dragado e bombeado para uma das lagoas de disposição, com teor de sólidos de 20%, em massa. Nesse segundo reservatório, o rejeito bombeado passa novamente por um processo de sedimentação e adensamento natural, onde a água sobrenadante à interface espessada é retornada à lagoa de transição, e reaproveitada, e o rejeito espessado é submetido a um processo de compactação natural até alcançar estabilidade mecânica em sua superfície. A lagoa de disposição representa o destino final desse resíduo mineral. Porém, devido a granulometria muito fina dessas partículas a sua velocidade terminal é muito lenta e parte da água demora para ser recuperada.

Neste contexto, o estudo de alternativas para disposição e desaguamento de rejeitos contribuirá com a redução de impactos ambientais e econômicos da mineração.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Investigar, de forma preliminar, a viabilidade do processo de consolidação mecânica acelerada em rejeitos de bauxita, por meio da aplicação de cenários experimentais com foco na consolidação e desaguamento da polpa.

A partir dessas premissas, será avaliada a sedimentação nas duas diferentes lagoas e a aplicação da consolidação mecânica acelerada, com o objetivo de avaliar de forma preliminar a sedimentação do rejeito de bauxita e a otimizar a consolidação dos rejeitos depositados na lagoa de disposição, aumentando o volume remanescente e permitindo o reaproveitamento da água retida na interface espessada.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar ensaios para caracterização da curva de sedimentação do rejeito de bauxita;
- Desenvolver e conduzir ensaios preliminares de consolidação mecânica em amostras de rejeito de bauxita laterítica, em escala de laboratório
- Identificar os principais parâmetros que influenciam o processo de consolidação mecânica e condições de aplicação de maior eficiência.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

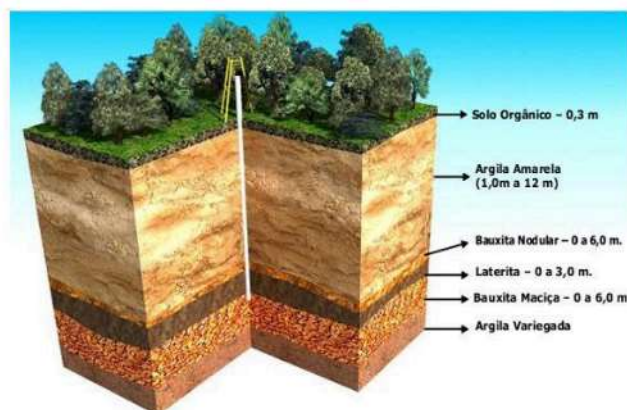
#### 3.1 MINÉRIO DE BAUXITA

A bauxita é utilizada na fabricação de alumínio metálico e ligas associadas a elementos como cobre e titânio. Cerca de 94% da produção mundial de bauxita é absorvida pela produção de alumínio, e paralelo a isso existem outras utilizações da bauxita como na fabricação de abrasivos, produtos químicos, materiais refratários, cimentos aluminosos (KOTSCHOUBEY, 1988).

A maior parte dos depósitos de bauxita no Brasil estão situados na região amazônica e em Minas Gerais. O minério da região amazônica, é encontrado na planície amazônica ou platô (TINOCO, 2017). As áreas dos depósitos de bauxita são cobertas pela vegetação típica da região e por solo orgânico. O perfil bauxítico da região amazônica é relativamente homogêneo em todo o platô e apresenta uma sequência de camadas estratificadas. Descritas do topo para a base, tem-se no topo uma camada de argila de cor amarelada, abaixo encontra-se a bauxita nodular, seguida da camada nodular ferruginosa (laterita), camada bauxítica (bauxita maciça) e na base a argila variegada (OMINIA MINÉRIOS, 2005). A Figura 01 demonstra o perfil litológico do minério bauxita.

Na mina bauxita em Juruti é atribuído valor econômico somente à Zona de laterita, que é constituída pelas subzonas de bauxita nodular, bauxita ferruginosa (laterita) e bauxita maciça. De modo que a subzona de bauxita maciça é lavrada e destinada aos processos subsequentes de beneficiamento, refinaria e redução. Diante disso, sob a ótica desse empreendimento o minério de interesse é a bauxita maciça (ALVES, 2015).

Figura 01 – Perfil litológico do minério de bauxita



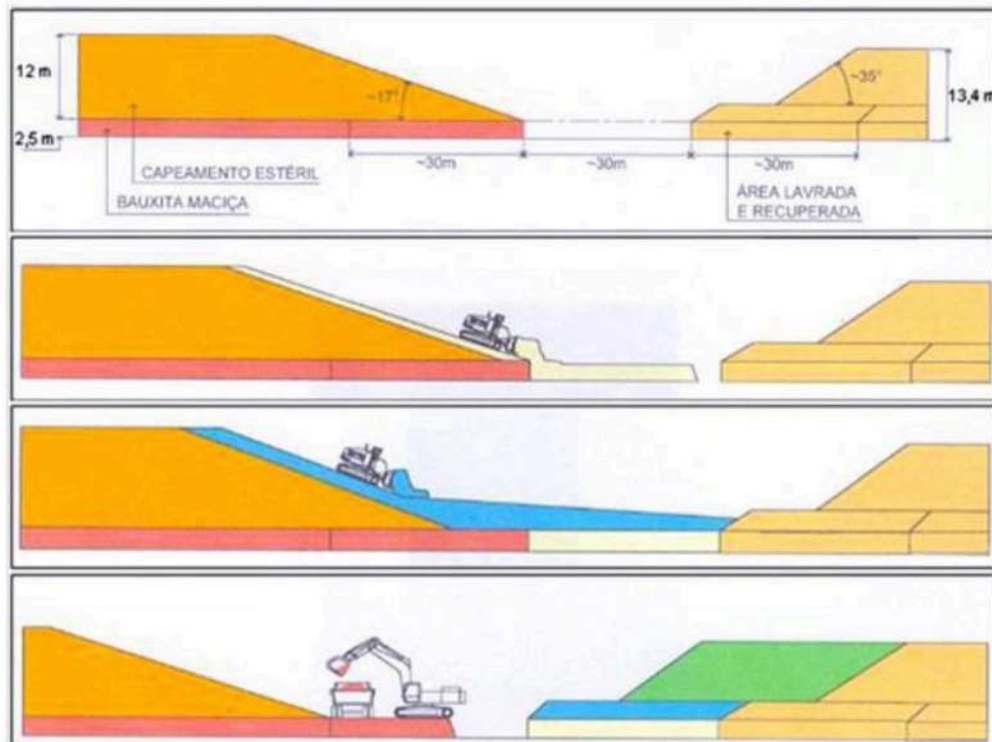
Fonte: GIRODO *et. al.* (2015).

Segundo Biondi (2004) a bauxita laterítica é encontrada em depósitos gerados diretamente por ações intempéricas em condições tropicais úmidas de rochas alumino-silicáticas, e preservados in situ. Os depósitos de bauxita da região amazônica são formados a partir de processos superficiais, especificamente em depósitos residuais. Esses depósitos são formados por processos intempéricos que atuam transformando ou concentrando minerais, originando assim as jazidas lateríticas. Além da gibbsita ( $\text{Al}(\text{OH})_3$ ) também podem estar presentes na bauxita, minerais como quartzo ( $\text{SiO}_2$ ), hematita ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), anatásio ( $\text{TiO}_2$ ) e caulinita ( $\text{Al}_2\text{SiO}_5$ ). Dessa forma, a composição química de amostras destes minérios se destaca por apresentar elevado teor de alumínio (Al), acompanhado por ferro (Fe), silício (Si) e titânio (Ti). Outros elementos costumam estar presentes, porém em quantidades menores como cálcio (Ca), potássio (K), manganês (Mn) e magnésio (Mg). Menos abundantes, ocorrem ainda boro (B), bário (Ba), berílio (Be), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), lítio (Li), molibdênio (Mo), chumbo (Pb), estanho (Sn), estrôncio (Sr), vanádio (V), ítrio (Y), zinco (Zn) e zircônio (Zr), como elementos traços, ou seja, na escala de parte por milhão (ppm) (SILVA e OLIVEIRA, 1992).

Os métodos de lavra dos minérios de bauxita variam de acordo com a natureza dos corpos mineralizados. A lavra desses minérios é feita, na maior parte, a céu aberto, segundo o método por tiras (*strip mining*). Estima-se que o maior número das jazidas de bauxita laterítica é lavrada por métodos a céu aberto (Röhrlich *et al.*, 2001). Menos de 20% da produção de bauxita no mundo é obtida por métodos de lavra subterrânea. O nível de mecanização na lavra é diversificado, dispondo-se desde a lavra manual até os métodos modernos com diversos tipos de equipamentos de mineração (ABAL, 2023).

No método de lavra em tiras (*strip mining*) (ABAL, 2019), tanto o minério quanto o estéril são removidos ao longo de cortes paralelos caracterizados por apresentarem pequena largura e grande comprimento, esses cortes paralelos são denominados de tiras. O estéril proveniente de uma tira é alocado para a tira anterior, onde o minério já foi extraído (SOUZA, 2001). Em um empreendimento minerário a aplicação desse método de lavra elimina a necessidade das pilhas de estéril. Percebe-se que de modo simultâneo acontece a abertura de uma nova tira e a reconformação e reabilitação da tira anteriormente lavrada. É interessante mencionar que as empresas integrantes da Associação Brasileira do Alumínio, a cada uma área minerada executam a recuperação de uma área degradada, segue-se então uma proporção de 1:1 (ABAL, 2019). A Figura 02 mostrando o esquema do método de lavra em tiras.

Figura 02 - Método de lavra em tiras.



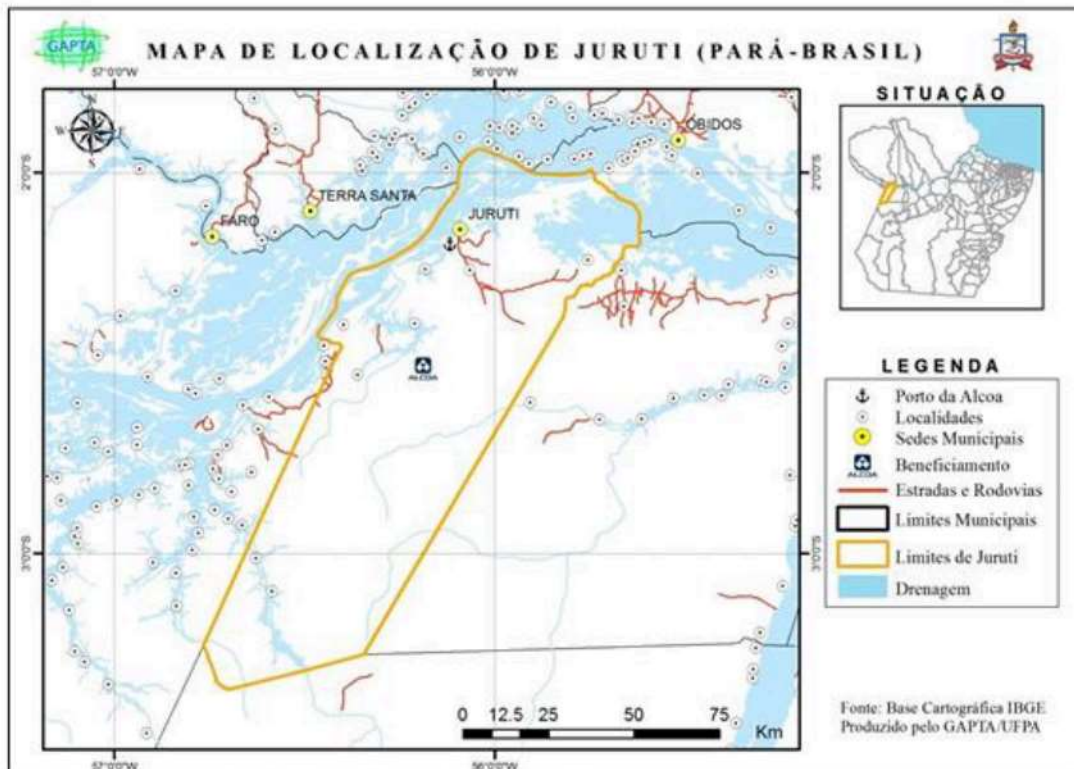
Fonte: SOUZA (2001).

Seu beneficiamento tem início com o processo de britagem, destinado à redução da granulometria, seguido da lavagem do minério com água, para remoção da fração fina com predominância de minerais ricos em sílica, e pôr fim a secagem. No processo tradicional de obtenção do alumínio, são realizadas as etapas de mineração, refino e redução. (QUARESMA, 2009).

### 3.2 MINA DE BAUXITA DE JURUTI

O Município de Juruti está localizado no extremo Oeste do Estado do Pará, pertencendo à mesorregião do Baixo Amazonas e microrregião de Óbidos. A cidade de Juruti está a 855 Km (em linha reta) de Belém, capital do estado do Pará, e a 450 Km de Manaus, capital do estado do Amazonas. Possui uma área de 8.305,298 Km<sup>2</sup> (IBGE, 2024). A população do município é de 50.881 habitantes de acordo com o censo 2022, com uma estimativa de 54.989 habitantes em 2027, o que corresponde a uma densidade de 6,13 habitantes por quilômetro quadrado (IBGE, 2024). A Figura 03 mostra o mapa com os limites do município de Juruti-PA

Figura 03 - Mapa de localização do município de Juruti (Pará-Brasil).



Fonte: SILVA & SILVA (2016).

A mina de bauxita em Juruti está localizada a 55 quilômetros na direção sul-sudoeste do município. A unidade foi fundada em 2006, e as operações iniciaram em 2009, possuindo uma reserva potencial de bauxita de 700 milhões de toneladas métricas. Sua taxa operacional atual é de 7,5 milhões de toneladas por ano (6,5 milhões de toneladas métricas secas) de bauxita de alta qualidade (ALCOA, 2009).

Segundo (ROCHA, 2023) 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 8), sendo que hoje está em fase de construção a LD 9 prevista para ser utilizada em 2026;
- Ferrovia, com aproximadamente 50,0 km de extensão, que transporta o minério de bauxita da planta de beneficiamento 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 (ROCHA, 2023).

A usina da mina de Juruti executa operações unitárias com o objetivo de adequação granulométrica do minério e a remoção da fração argilosa e minerais de sílica associados (PAIVA, 2019). Isso decorre do fato de que a bauxita proveniente da mina não necessitar da aplicação de técnicas complexas de concentração, uma vez que os teores demonstrados por esse minério são naturalmente aceitáveis para incorporação no mercado, e caso haja a necessidade de elevação desse teor, a lavagem da bauxita e conseqüente remoção de seus contaminantes tem se mostrado suficiente (GANCEV, 2009). Sendo assim, conforme Paiva (2019), na usina de beneficiamento instalada no empreendimento em Juruti, a bauxita maciça é submetida às seguintes etapas:

- **Cominuição:** Nessa etapa do processamento mineral da bauxita são executadas a etapa de britagem com um britador de rolos dentados a fim de que seja atingida a especificação granulométrica estabelecida para o produto beneficiado;
- **Lavagem e desagregação:** Essas etapas subsequentes à cominuição são aplicadas para remover as partículas finas, aquelas com granulometria inferior a 0,037 mm, faixa granulométrica em que ocorrem os contaminantes da bauxita. Normalmente, mescla-se o equipamento de lavagem e desagregação, a uma peneira rotativa;
- **Peneiramento:** trata-se da etapa responsável por segregar, em duas frações granulométricas, as partículas com tamanhos distintos. No processamento mineral da bauxita são amplamente utilizadas as peneiras vibratórias, tanto horizontais quanto as inclinadas;
- **Classificação:** Por fim, essa etapa objetiva separar as partículas presentes na alimentação em uma fração predominantemente composta por partículas grossas e em outra fração constituída de partículas finas. As frações mais finas seguem, sob a forma de polpa, para baterias de hidro ciclones, capazes de recuperar as frações finas e superfinas contidas na polpa. A fração menor que 400 Mesh (0,037 mm) sai como rejeito e segue por tubulação para os reservatórios ou lagoas de rejeito.

Após a lavagem do minério de bauxita na mina de Juruti, a polpa de rejeito, com um teor de sólidos de 7%, é bombeada hidraulicamente a lagoa de transição. Neste reservatório, o

rejeito passa por um processo de sedimentação natural, para promover a separação sólido-líquido da polpa. Dessa forma, a água sobrenadante pode ser reutilizada no processo de beneficiamento do minério. O principal objetivo da lagoa de transição é a sedimentação das partículas e o armazenamento de água para o processo (ALCOA, 2024).

A polpa espessada no reservatório de transição é desagregada e bombeada hidráulicamente, por uma draga, para um dos 8 reservatórios de disposição a uma taxa média de 20% de sólidos. Neste reservatório, o rejeito passa por um processo de sedimentação por gravidade, durante o qual parte da água sobrenadante à polpa é redirecionada para a lagoa de transição para reutilização no processo. A porcentagem de água reutilizada varia, sendo de 80% durante o período chuvoso e de 50% no período seco, enquanto outra parte é perdida por evaporação e infiltração. São realizados lançamentos sucessivos de polpa nesses reservatórios até que não haja mais volume remanescente. Após o enchimento do reservatório, os lançamentos são suspensos, e o rejeito passa por um processo de secagem natural em função da sua exposição às condições climáticas. Atestado condições de segurança é realizado o descomissionamento do reservatório. A Figura 04 demonstra o processo de disposição de rejeito sequenciado (ALCOA, 2024).

Após a disposição na lagoa de disposição, a concentração de sólidos da polpa aumenta gradativamente ao longo do tempo em razão de sua exposição ao ambiente natural. A perda de umidade ocorre devido à evaporação da água exposta à luz solar e à infiltração no solo (ALCOA, 2024).

Figura 04 - Fluxograma de disposição de rejeito sequenciado



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

### 3.3 REJEITO DE BAUXITA

De acordo com Almeida *et al.* (2021), O gerenciamento dos rejeitos de bauxita envolve diversos desafios técnicos e ambientais. A disposição inadequada desses rejeitos pode resultar em sérios problemas ecológicos, como a poluição de recursos hídricos e a degradação do solo. Uma abordagem integrada para a disposição de rejeitos deve considerar não apenas o impacto ambiental direto, mas também os efeitos de longo prazo sobre o ecossistema. É crucial

implementar práticas de monitoramento rigoroso e técnicas de disposição que minimizem os impactos negativos (ALMEIDA *et al.*, 2021).

Segundo IBRAM (2016) na geração de resíduos da mineração, destaca-se a existência dos resíduos sólidos de extração (estéril) e do tratamento/beneficiamento do minério (rejeitos). Estes resíduos, de modo geral, podem ser pilhas de minérios pobres, estéreis, rochas, sedimentos, solos, aparas e lamas das serrarias de mármore e granito, as polpas de decantação de efluentes, as sobras da mineração artesanal de pedras preciosas e semipreciosas – principalmente em região de garimpos – e finos e ultrafinos não aproveitados no beneficiamento.

É importante realizar a diferenciação entre os termos resíduo e rejeito. No contexto atual do gerenciamento de resíduos, denomina-se como rejeito os materiais produzidos durante o tratamento de minério/ processamento mineral, que até o presente momento, não são passíveis de uma recuperação total ou pelo menos parcial do quantitativo produzido, sendo possível somente a disposição final via métodos úmidos ou secos para armazenamento dos mesmos (PEREIRA, 2019).

Os métodos convencionais de disposição de rejeito se caracterizam pela disposição na sua condição natural, isto é, como descartado pelas plantas de beneficiamento, em geral, consiste em uma lama fluida. Nestes métodos, a disposição é feita de forma contínua e grandes áreas são ocupadas, o que requer diques ou barragens para sua contenção. Além disso, grandes volumes de água são perdidos nesse processo (QUISPE, 2011).

A disposição de rejeitos em reservatórios criados por diques de contenção ou barragens é o método mais comumente usados. Estas barragens ou diques podem ser de solo natural ou ser construídos com os próprios rejeitos, sendo classificados, neste caso, como barragens de contenção alteadas com rejeitos e as de solo natural como barragens convencionais (CRUZ, 2023).

### 3.4 SEDIMENTAÇÃO DE REJEITO DE BAUXITA

A maioria dos processos de beneficiamento mineral e metalúrgicos ocorre na presença de água devido às vantagens inerentes ao processamento a úmido (separação, transporte, dentre outras). Entretanto, essa necessidade por água tem se tornado uma importante preocupação no setor, especialmente em termos de conservação, tratamento e reuso. Nesse contexto, as operações de desaguamento baseadas na separação sólido-líquido ganham maior importância (FRANÇA e MASSARANI, 2018)

A sedimentação é um dos processos de separação sólido-líquido baseada na diferença entre as densidades dos constituintes de uma suspensão; a remoção das partículas sólidas presentes em uma corrente líquida se dá pela ação do campo gravitacional, o que oferece ao processo as características de baixo custo e grande simplicidade operacional (FRANÇA e MASSARANI, 2018).

Com isso, a sedimentação gravitacional de rejeitos em lagoas de mineração é um processo natural em que partículas sólidas suspensas no rejeito (subproduto do beneficiamento mineral) se depositam no fundo da lagoa sob a influência da gravidade.

Os processos de lançamento dos rejeitos formam depósitos muito heterogêneos, cujas camadas variam em espessura e distribuição granulométrica (SOARES, 2010). Esses fatores, quando combinados, determinam a eficiência da deposição de rejeitos, a segurança da lagoa e a sua capacidade de armazenamento de rejeitos ao longo do tempo.

Os processos de mineração do minério de bauxita produzem grandes volumes de rejeitos composto de materiais muito finos. Esse material apresenta, inicialmente, elevados teores de umidade e índices de vazios, que são diminuídos gradativamente com o tempo. As partículas do solo entram em contato entre si, começa a surgir o princípio de tensões efetivas. Neste momento, inicia-se o processo de consolidação (QUISPE, 2011).

### 3.5 CONSOLIDAÇÃO MECÂNICA ACELERADA

A Consolidação Mecânica Acelerada (*Accelerated mechanical consolidation - AMC*), conhecida como *mud-farming*, oferece uma solução para o desafio do gerenciamento de rejeitos. Ela proporciona uma separação rápida da água dos sólidos nos rejeitos depositados, resultando em material de deposição mais denso e mais seco, que é mais seguro e estável ao longo do tempo (CABRERA, 2019).

O processo de consolidação mecânica acelerada consiste em aplicar uma carga de forma mecânica sobre o material e promover a compactação das partículas, expulsando a água e, conseqüentemente, promovendo a redução da porosidade. A aplicação dessa carga induz o princípio de tensão efetiva e acelera significativamente a sua consolidação, aumentando sua estabilidade mecânica e promovendo o desaguamento imediato da polpa. Essa técnica melhora a resistência do material, reduz sua permeabilidade e aumenta sua capacidade de suporte de carga (CABRERA, 2019). Munro e Smirk (2018) reiteram que as técnicas AMC oferecem o potencial para alcançar elevadas densidades e resistências finais através de desidratação e consolidação melhoradas ou contínuas, ao mesmo tempo que proporcionam um meio de gerir

muitos problemas pós-colocação que podem ocorrer. Esta abordagem pode ser aplicada no projeto ou adotada na fase de operação e é eficaz em pastas de baixa densidade até pastas de alta densidade. A consolidação mecânica acelerada evoluiu a partir da indústria de alumina e agora é uma prática comum em muitas outras commodities e indústrias e é muito mais barata do que suas contrapartes de desidratação pré-descarte. As Figuras 05 e 06 mostram imagens da máquina de propulsão por parafuso e flutuante modelo Mudmaster, fabricada pela Phibion, empregada no processo de consolidação acelerada e o rejeito de bauxita consolidado após a passagem do equipamento.

Quando aplicado a materiais altamente floculados ou altamente porosos, ele colapsa os poros e aumenta rapidamente a densidade para níveis equivalentes à filtração ou centrifugação (MUNRO; SMIRK, 2018).

Figura 05 – Máquina de propulsão por parafuso e flutuante MudMaster - Phibion.



Fonte: PHIBION (2015).

É importante neste momento não confundir consolidação com desidratação, pois uma não está necessariamente relacionada com a outra. Por exemplo, a desidratação pode ser facilmente realizada através da floculação, mas o material colocado pode manter uma taxa de vazios ou porosidade extraordinariamente alta (YAO, 2012). Portanto, é importante determinar a densidade aparente e a resistência in situ, e não simplesmente medir o retorno de água para

estabelecer a consolidação (FITTON; SEDDON 2013).

Figura 06 – Rejeito de bauxita consolidado.



Fonte: PHIBION (2015)

O processo é em grande parte realizado por drenagem ascendente na maioria dos materiais, embora possa haver evaporação dominante em algumas argilas. Destaca-se que esse método necessita de equipamentos especialmente concebido para garantir um cisalhamento mínimo. Isso não apenas anula a aplicação econômica de tratores e escavadeiras para aplicações em larga escala, mas também requer uma janela estreita de configuração ideal do equipamento e do rejeito. Nas últimas décadas, isso levou ao uso de máquinas de propulsão por parafuso e flutuantes, comumente conhecidas como anfiróis (CABRERA, 2019). Mas, pouco estudos tem mostrado a efetividade da aplicação desse método.

## 4. MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

#### 4.1.1 Análise granulométrica

Regulamentado pela ABNT 7181/2018, o ensaio de granulometria é o procedimento utilizado para a determinação da percentagem 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 (ROCHA, 2023).

O ensaio de peneiramento é executado para partículas maiores que 0,075 mm de diâmetro. Consistindo em agitar uma amostra de solo por um conjunto de peneiras que tenham aberturas progressivamente menores. As peneiras granulométricas são padronizadas pela NBR 5734/1997. As porções retidas em cada peneira é medida e transformada em percentagem retida. Esses valores são plotados em um gráfico, que corresponde a percentagem passante em função do tamanho das partículas, sendo o eixo das abscissas em escala logarítmica. Esse gráfico é chamado de curva de distribuição granulométrica (DAS, 2007). A Tabela 01 mostra a classificação de partículas minerais em função a sua granulometria média.

Tabela 01 - Faixa granulométrica dos grãos (ABNT-NBR 6502)

Classificação	Diâmetro das partículas
	<i>mm</i>
Argila	< 0,002
Silte	0,002 - 0,06
Areia fina	0,06 - 0,02
Areia grossa	0,2 - 2
Pedregulho	2 - 60

Fonte: ABNT (2016).

### 4.2 COLETA E PREPARAÇÃO DA AMOSTRA

A amostra de polpa de bauxita foi coletada do processo industrial da mina em Juruti. O processo de preparação teve início com a homogeneização do rejeito para garantir uma distribuição uniforme da umidade e das partículas. Isso ajuda a evitar a formação de aglomerados e assegura que a evaporação ocorra de maneira consistente. O rejeito

homogeneizado foi distribuído em uma camada fina no interior de um recipiente plástico, para ser exposta ao sol. A exposição aos raios solares aumenta a temperatura da amostra fazendo com que a água passe do estado líquido para o estado gasoso. Dessa forma, através do processo de evaporação, a umidade presente na polpa foi removida, permanecendo apenas a fração sólida do rejeito. A Figura 07 mostra imagens da amostra coletada, do material preparado para secagem e após 10 horas secando ao sol.

Figura 07 - Processo de homogeneização e secagem da amostra: Homogeneização e retirada de porção da amostra (A), Amostra distribuída em camada fina no interior do recipiente plástico (B) e Fração sólida da amostra resultante do processo de evaporação (C)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

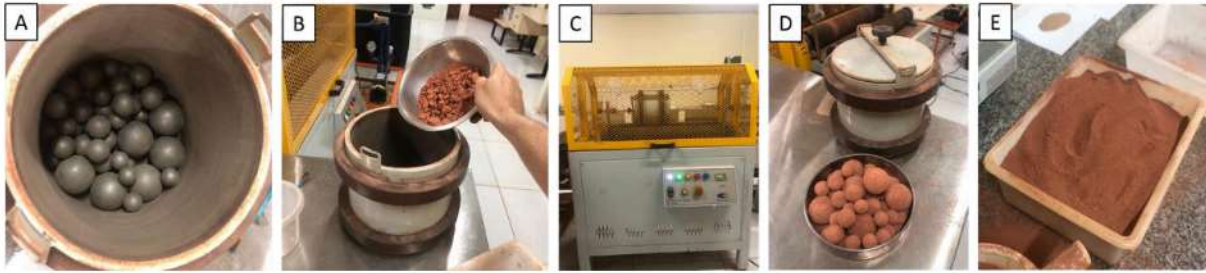
Após a secagem da amostra, observa-se a formação de aglomerados, que foram desagregados. Para a realização deste processo, foi utilizado o moinho de bolas modelo SL-34/2P, fabricado pela SOLAB, mostrado na Figura 08. Para realizar o processo, o jarro do moinho foi carregado com a amostra, bem como com 20 esferas de aço de 13 mm, 20 esferas de aço de 19 mm e 4 esferas de aço de 25 mm. A operação foi conduzida a uma velocidade de 45 RPM durante 25 minutos. A Figura 09 demonstra o processo de moagem da amostra.

Figura 08 - Moinho de bolas SL-34/2P



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

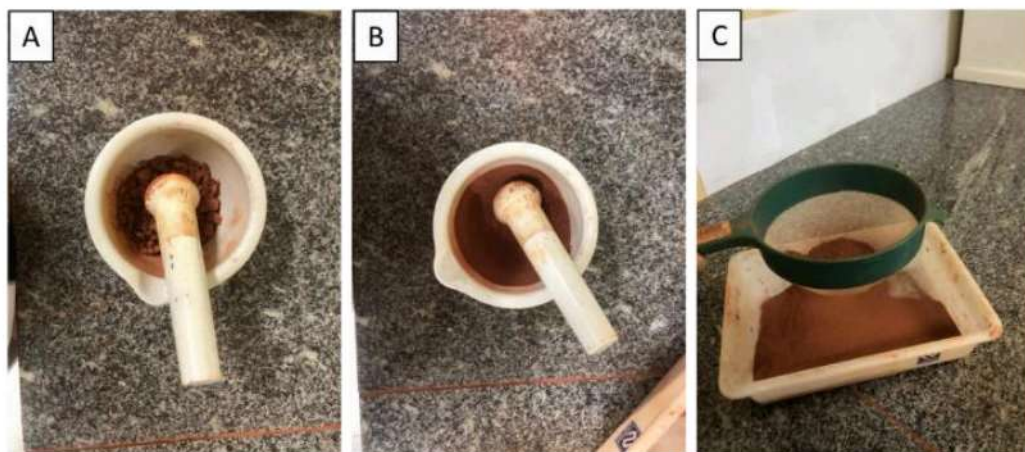
Figura 09 - Processo de moagem da amostra: Inserção de bolas no jarro (A), Inserção da amostra no jarro (B), Operação do moinho (C), Retirada das bolas do jarro (D) e Amostra pulverizada (E)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O material obtido após a desagregação o material foi submetido ao processo de peneiramento, utilizando uma peneira simples para a obtenção de partículas mais finas. O material retido na peneira foi então pulverizado com o auxílio de um pistilo e um almofariz, a fim de reduzir ainda mais o tamanho das partículas e realizar um novo peneiramento. Dessa forma, foi obtido o material para a realização dos ensaios de sedimentação e consolidação mecânica, conforme mostra a Figura 10.

Figura 10 - Processo Pulverização e peneiramento da amostra: Pulverização da amostra (A e B) e Peneiramento da amostra (C)



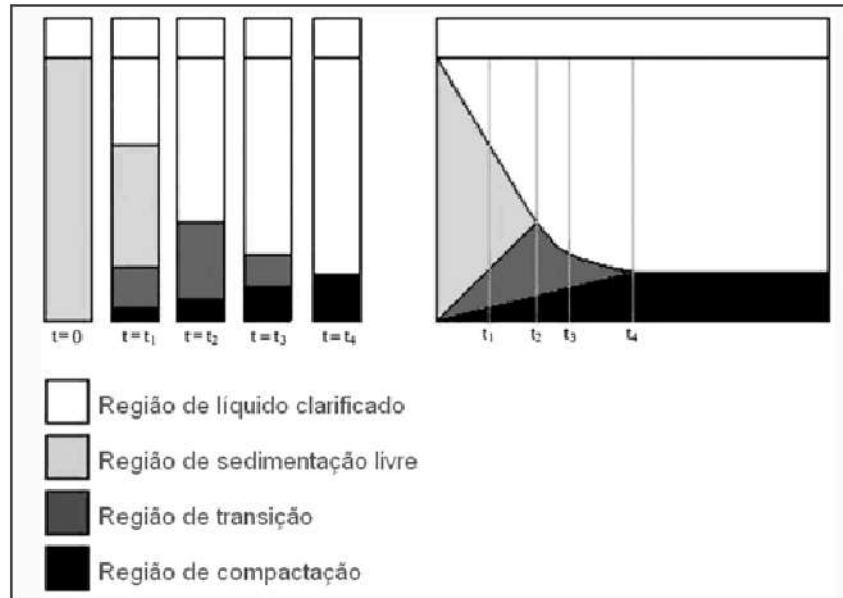
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

### 4.3 ENSAIO DE SEDIMENTAÇÃO

A Teoria de Kynch (1952) consiste na interpretação dos eventos que acontecem quando uma polpa está sedimentando através do ensaio descontínuo de sedimentação que é realizado em laboratório. Este ensaio se baseia no monitoramento da região de compactação na interface descendente e conhecimento da concentração inicial de sólidos no teste de proveta que possibilitaram entender o comportamento de sedimentação e espessamento da polpa ao longo

do tempo. Através do ensaio será obtido a curva de sedimentação da polpa e a concentração final de sólidos na interface compactada. A Figura 11 mostra o deslocamento das interfaces ao decorrer do tempo e ilustra também as regiões observadas no ensaio de proveta

Figura 11 - Teoria de Kynch aplicada a ensaio de sedimentação em laboratório.



Fonte: SAMPAIO (2014).

Visando compreender o processo de separação sólido-líquido em ambos os reservatórios, foram realizados ensaios laboratoriais de sedimentação utilizando 100 ml de polpas com diferentes concentrações. Para a lagoa de transição, foram simuladas polpas com 6%, 7% e 9% de sólidos, enquanto para a lagoa de disposição, foi utilizada polpa com 20% de sólidos. Todos os ensaios foram feitos em duplicata com o objetivo de determinar o desvio padrão dos processos.

Para a preparação das polpas empregadas nos ensaios de sedimentação, foram calculadas as quantidades em massa dos sólidos e da água a serem adicionados em cada sistema. Desta forma, foram utilizadas as Equações 01 e 02 para determinar o quantitativo. A proporção de água e de sólidos usadas para preparação das diferentes concentrações de sólidos são apresentadas na Tabela 02.

$$V_p = V_a + V_s \quad \therefore \quad V_p = \frac{M_a}{\rho_a} + \frac{M_s}{\rho_s} \quad (01)$$

$$\omega = V_p \left( \frac{M_s}{M_p} \right) \quad \therefore \quad \omega = V_p \left( \frac{M_s}{(M_a + M_s)} \right) \quad (02)$$

Onde:

- $\omega$  = Teor de sólidos;
- $V_p$  = Volume da polpa;
- $V_a$  = Volume de água na polpa;
- $V_s$  = Volume de sólidos na polpa;
- $M_p$  = Massa da polpa;
- $M_a$  = Massa de água na polpa;
- $M_s$  = Massa de sólidos na polpa;
- $\rho_a$  = Densidade da água;
- $\rho_s$  = Densidade de sólidos.

Tabela 02 - Detalhamento de parâmetros das polpas do ensaio de sedimentação.

$\omega$	Identificação	Massa de água (g)	Massa de sólidos (g)	Volume de água (ml)	Volume de sólidos (ml)	Massa total (g)	Volume Total (ml)
6%	A/ A1	97,85	6,25	97,85	2,15	104,10	100,00
9%	B/ B1	96,60	9,89	96,60	3,40	106,49	100,00
12%	C/ C1	95,53	13,02	95,53	4,47	108,55	100,00
20%	D/ D1	92,09	23,02	92,09	7,91	115,11	100,00

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com o auxílio de uma balança semi-analítica, foram pesadas a massa de água e a massa de sólidos necessárias para a preparação da polpa, conforme os cálculos realizados (Figura 12).

As frações líquidas e sólidas foram adicionadas em uma proveta de 100 ml e agitadas por 2 minutos, logo após as provetas foram colocadas em uma superfície plana para permitir o repouso do sistema e iniciar o processo de sedimentação da porção sólida. A altura da interface de sedimentação foi medida e registrada com o auxílio de uma régua nos seguintes intervalos de tempo após o início do ensaio: 0, 1, 3, 5, 7, 10, 15, 30, 60, 120 e 240 minutos.

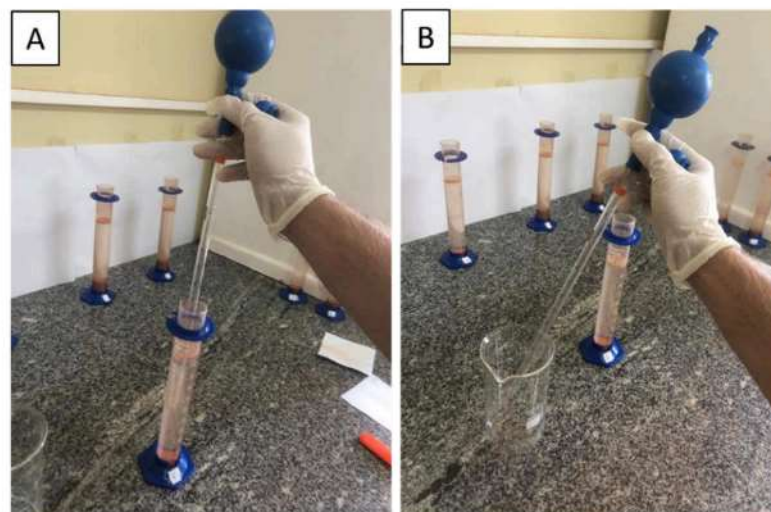
Figura 12 - Preparação das polpas para ensaio de sedimentação: Teor de 6% (A1 e B1), Teor de 9% (B e B1), Teor de 12% (C e C1) e Teor de 20% (D e D1)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para determinar o teor de sólidos e a umidade presente na camada espessada, a água sobrenadante (região de líquido clarificado) a polpa foi removida com o auxílio de uma pipeta (Figura 13). A partir da análise da massa final do sistema, foi possível calcular a massa de água retida na interface adensada, através da subtração da massa inicial da proveta e da massa de sólidos introduzidos no sistema. Essa umidade representará a água retida na polpa que não poderá ser captada na lagoa de transição e disposição.

Figura 13 - Remoção da água sobrenadante dos ensaios



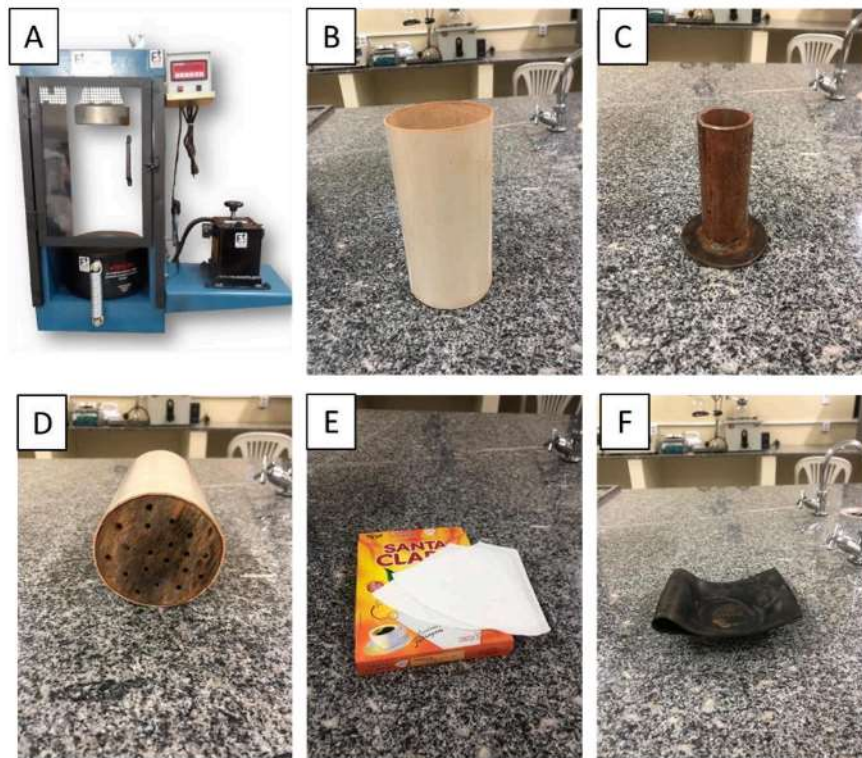
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

#### 4.4 ENSAIO DE CONSOLIDAÇÃO MECÂNICA ACELERADA

A realização do ensaio de consolidação acelerada visa identificar a redução da umidade para diferentes teores de polpas disposta em lagoas de sedimentação. Desta forma, será possível determinar os melhores cenários de operacionalização da metodologia, assim como, determinar a sua eficiência em comparação ao método de sedimentação natural.

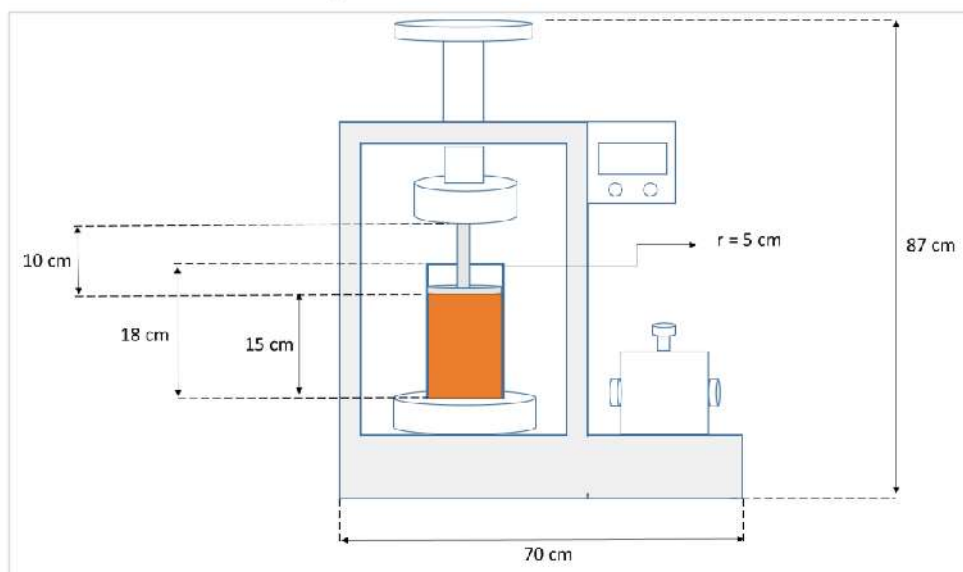
Para viabilizar o teste de consolidação mecânica, foram fabricados componentes adaptáveis a uma prensa hidráulica manual (Figura 14A), com o objetivo de simular de forma preliminar a pressão aplicada pelo equipamento Mudmaster, mostrado na Figura 6 ao rejeito disposto na lagoa de disposição. Utilizou-se um tubo de PVC para o corpo do sistema (Figura 14B), uma haste de compactação para permitir a aplicação de carga sobre o corpo de prova (Figura 14C), uma base de madeira com furos para possibilitar o desaguamento da polpa (Figura 14D), filtros de papel para evitar o vazamento das partículas (Figura 14E) e dois pedaços de borracha para manter a vedação e pressão no sistema (Figura 14F). A Figura 15 representa o sistema e suas dimensões.

Figura 14 - Componentes do sistema: Prensa hidráulica (A), Tubo de PVC (B), Haste de compactação (C), Base de madeira (D), Filtro de papel (E) e Borracha (F)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 15 - Dimensões do sistema



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Foram submetidas aos ensaios polpas de 30%, 40%, 50% e 60% de sólidos, o Tabela 03 mostra os parâmetros das polpas usadas em cada ensaio. A altura da camada de rejeito para cada uma das polpas inserida no sistema foi de 15 cm. Todos os ensaios foram realizados em duplicata com o objetivo de determinar o desvio padrão dos processos.

A preparação das polpas teve início com a pesagem das frações sólidas e líquidas, utilizando uma balança comercial. Após a pesagem, a polpa foi homogeneizada em um recipiente plástico e, em seguida, despejada no protótipo AMC até formar uma camada de rejeito de 15 cm. O processo de preparação das polpas para o ensaio de consolidação mecânica está ilustrado na Figura 16.

Tabela 03 - Detalhamento de parâmetros das polpas do ensaio de consolidação mecânica

$\omega$	Identificação	Massa de água (g)	Massa de sólidos (g)	Volume de água (ml)	Volume de sólidos (ml)	Massa total (g)	Volume Total (ml)
30%	E1/ E2	1004,50	430,50	1004,50	147,94	1435,00	1152,44
40%	E3/ E4	871,80	581,20	871,80	199,73	1453,00	1071,53
50%	E5/ E6	793,00	793,00	793,00	272,51	1586,00	1065,51
60%	E7/ E8	612,80	919,20	612,80	315,88	1532,00	928,68

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Figura 16 - Preparação das polpas para ensaio de consolidação mecânica: Pesagem da fração líquida (A), Pesagem da fração sólida (B), Homogeneização das frações (C) e Inserção no protótipo (D).



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Após a inserção da polpa, o sistema foi ajustado à prensa hidráulica e submetido a uma força constante. Quando foram aplicadas forças de 0,25 tf, 0,50 tf e 0,75 tf, os ensaios foram interrompidos para a avaliação e registro da massa da água drenada da polpa. Uma vez obtidos os resultados, será possível estabelecer a correlação entre a força aplicada e o teor da polpa depositada.

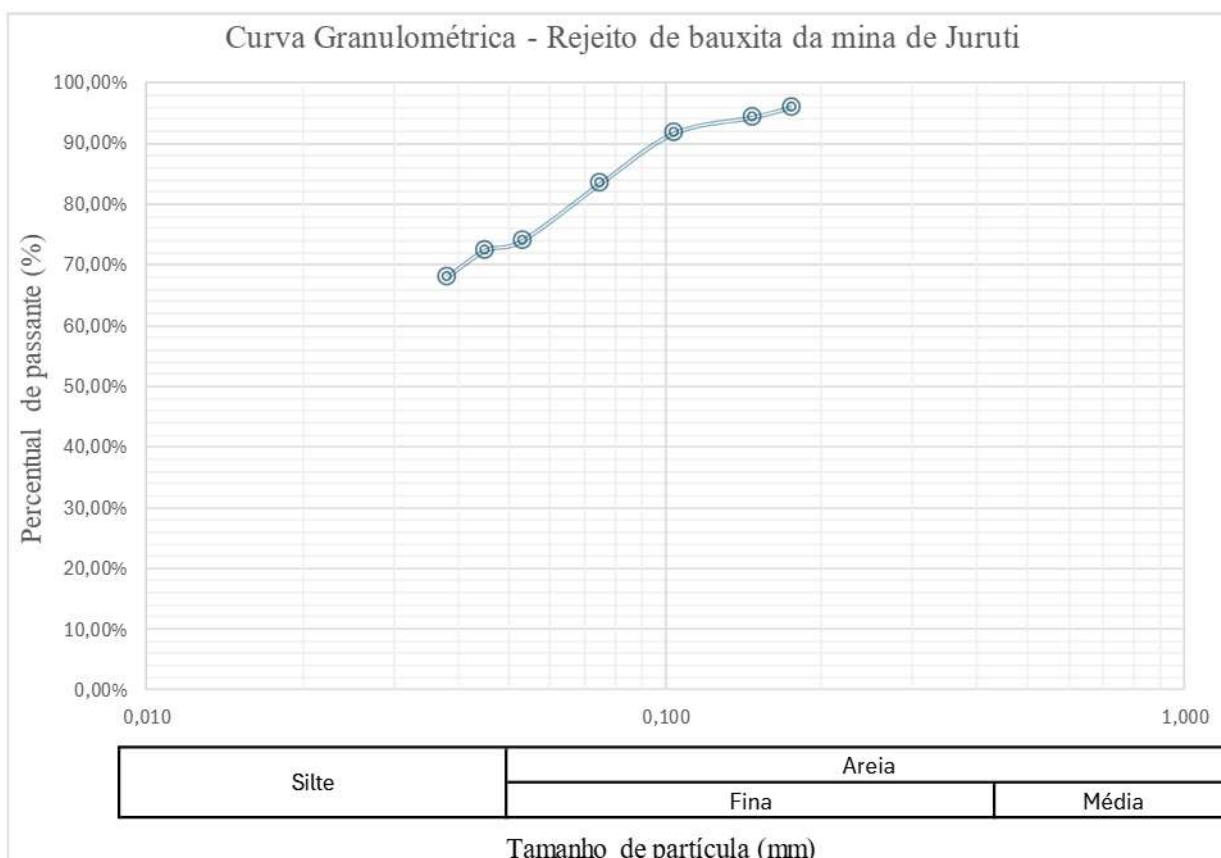
Os experimentos de caracterização, sedimentação e aceleração mecânica consolidada foram realizados no laboratório de tratamento de minérios no campus universitário da Universidade Federal do Oeste do Pará em Juruti (UFOPA-CJUR).

## 5. RESULTADOS

### 5.1 GRANULOMETRIA

A Figura 17 mostra a curva de distribuição granulométrica da amostra de rejeito de bauxita. Observa-se uma predominância de partículas finas, abaixo de 0,1 mm. Esta distribuição afeta diretamente a permeabilidade e a capacidade de drenagem do solo, evidenciando uma menor eficiência na drenagem da água e menor velocidade terminal de sedimentação.

Figura 17 - Curva granulométrica da amostra de rejeito de bauxita da mina de Juruti.

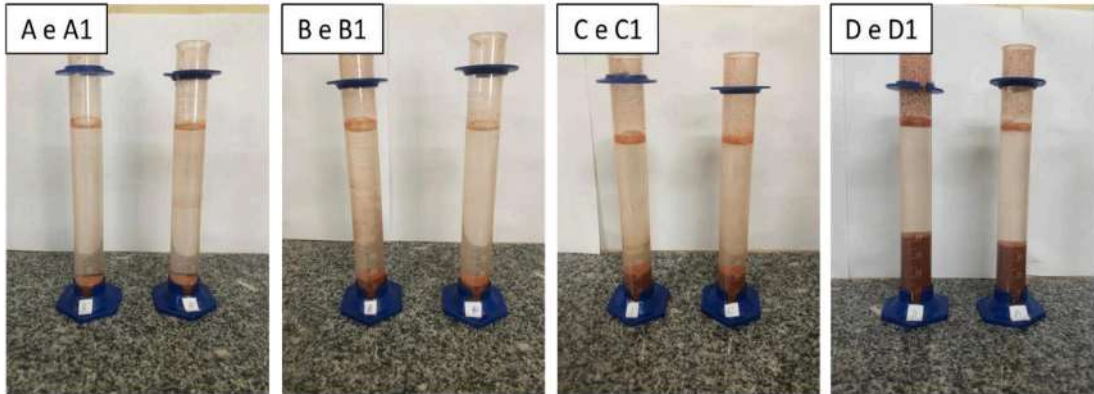


Fonte: SANTOS (2024).

### 5.2 CURVA DE SEDIMENTAÇÃO

A Figura 18 mostra as imagens do ensaio de sedimentação para as concentrações de sólidos de 6, 9, 12 e 20 % em massa. Observa-se a interface da camada espessada (partículas sedimentadas) ao fim do ensaio experimental (após 240 minutos).

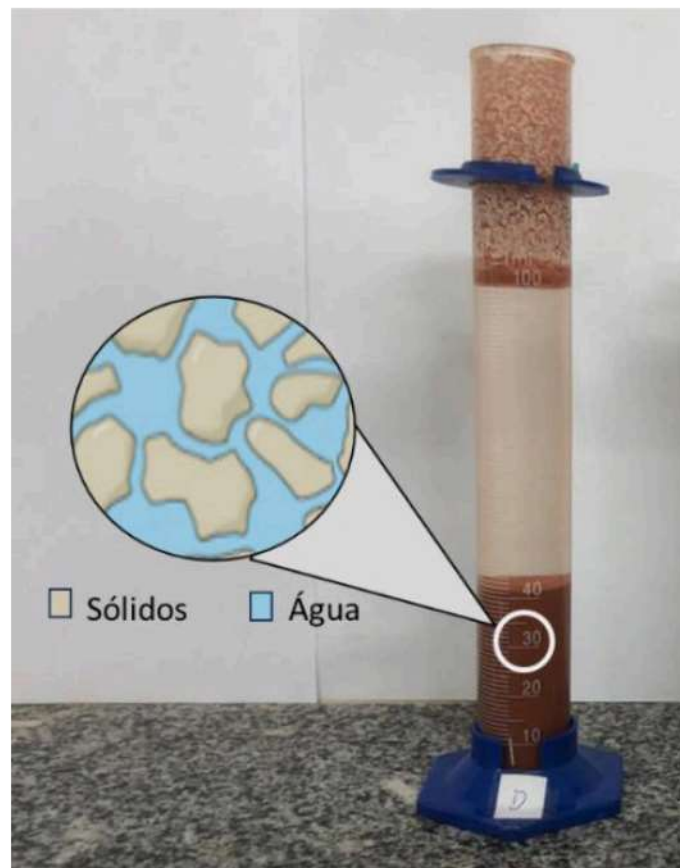
Figura 18 - Interface da camada espessada das polpas: Teor de 6% (A1 e B1), Teor de 9% (B e B1), Teor de 12% (C e C1) e Teor de 20% (D e D1)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A fração líquida entre as partículas espessadas que não é expulsa pela pressão aplicada pela coluna de água sobrenadante permanece retida na interface, impedindo seu reaproveitamento e recirculação no processo. A Figura 19 ilustra a região de compactação e é onde a água fica retida na camada espessada.

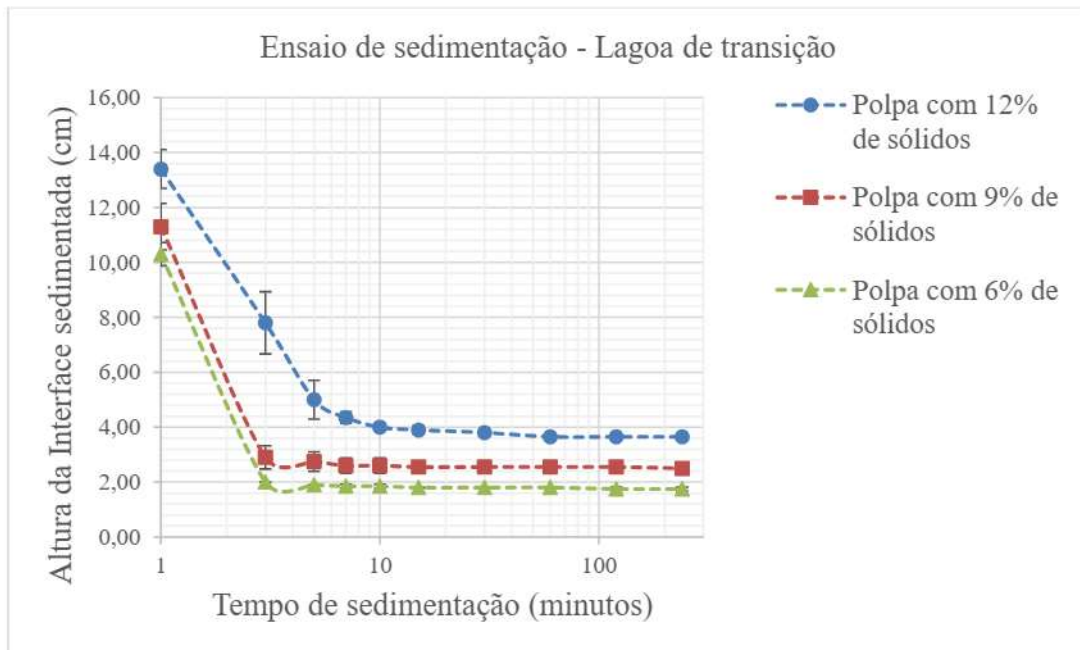
Figura 19 – Água retida na camada espessada



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 20 mostra a curva de sedimentação das polpas com 6, 9 e 12 % de sólidos. Observa-se que no tempo  $t=0$  min, todas as polpas apresentavam uma homogeneização completa, com a concentração de sólidos sendo constante em todos os pontos. Durante o ensaio, a concentração de sólidos aumentou gradativamente de cima para baixo, indicando o início do processo de sedimentação e a formação de zonas com diferentes concentrações em  $t>0$  min. A partir do instante  $t=3$  min a velocidade de sedimentação das polpas de 6% e 9% diminuem e a da polpa de 12 % tem sua velocidade reduzida no instante  $t=5$  min. A zona de sedimentação livre, composta por partículas de menor diâmetro, foi observada até o instante  $t=3$  min para as polpas de 6% e 9% e  $t=5$  min para a de 12%, isso ocorre devido à predominância de partículas finas na amostra. O ponto crítico de sedimentação foi registrado no instante  $t=7$  min para as polpas de 6% e 7% e  $t=10$  min para a amostra de 12%. A partir desse momento, a camada espessada foi submetida a um processo de compactação dos sólidos, resultando na expulsão de uma parte da fração líquida entre as partículas para a zona de líquido clarificado.

Figura 20 - Curva de sedimentação dos ensaios com diferentes percentuais de sólidos



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O Tabela 04 apresenta a umidade retida na interface espessada após a remoção da água sobrenadante a polpa. Observa-se que a camada espessada no fundo da proveta, independente o percentual de sólidos inicial, foi composta por cerca de 57,32% de umidade em massa.

Tabela 04 - Umidade retida na interface espessada nos ensaios de sedimentação

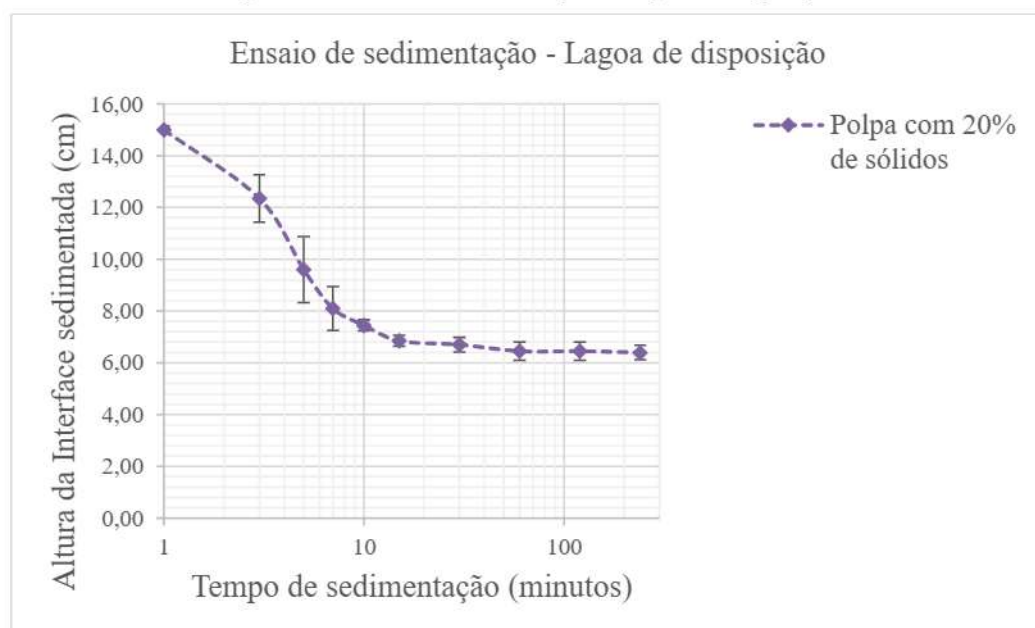
$\omega$	Identificação	Umidade na polpa espessada (%)	Percentual de sólidos na polpa espessada (%)
6%	A/ A1	58,32%	41,68%
9%	B/ B1	58,25%	47,75%
12%	C/ C1	55,39%	44,61%

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O rejeito sedimentado no reservatório de transição é bombeado para a lagoa de disposição com uma concentração de aproximadamente 22% de sólidos. Nesta lagoa, a polpa passa por um processo de sedimentação e adensamento natural. No entanto, ao contrário do reservatório de transição, não haverá dragagem do rejeito na lagoa de disposição. Após o esgotamento do volume remanescente, a lagoa será descomissionada e toda polpa será coberta por uma camada vegetal. A partir do ensaio de sedimentação realizado nas provetas D e D1 foi possível analisar como ocorre o processo de sedimentação na lagoa de disposição.

Através das variáveis identificadas na análise foi possível desenvolver a curva de sedimentação das polpas com 20 % de sólidos (Figura 21).

Figura 21 - Curva de sedimentação da lagoa de disposição



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Por possuir uma maior concentração de sólidos que a polpa depositada na lagoa de espessamento, o processo de sedimentação na lagoa de disposição ocorre de forma mais lenta e acentuada, entretanto com as mesmas características. A velocidade de sedimentação diminuiu a partir do instante  $t=7$  min devido ao maior volume de sólidos na polpa. A zona de sedimentação livre, composta por partículas de menor diâmetro, foi observada até o instante  $t=15$  min. O ponto crítico de sedimentação foi registrado no instante  $t=60$  min. A partir desse momento, a camada espessada foi submetida a um processo de compactação dos sólidos, resultando na expulsão de uma parte da fração líquida entre as partículas para a zona de líquido clarificado.

A Tabela 05 apresenta a umidade retida na interface espessada após a remoção da água sobrenadante a polpa. Observa-se que, a umidade retida na camada espessada de ambos os reservatórios corresponde a aproximadamente 57% da massa total da camada. No entanto, o volume de água retido na lagoa de disposição é até duas vezes superior ao volume na lagoa de transição. Este volume de água será percolado para o terreno ou evaporado devido à exposição à luz natural, como parte do processo de descomissionamento do reservatório.

Tabela 05 - Umidade retida na interface espessada da Lagoa de disposição

$\Omega$	Identificação	Umidade na polpa espessada (%)	Percentual de sólidos a na polpa espessada (%)
20%	D/ D1	57,49%	42,51%

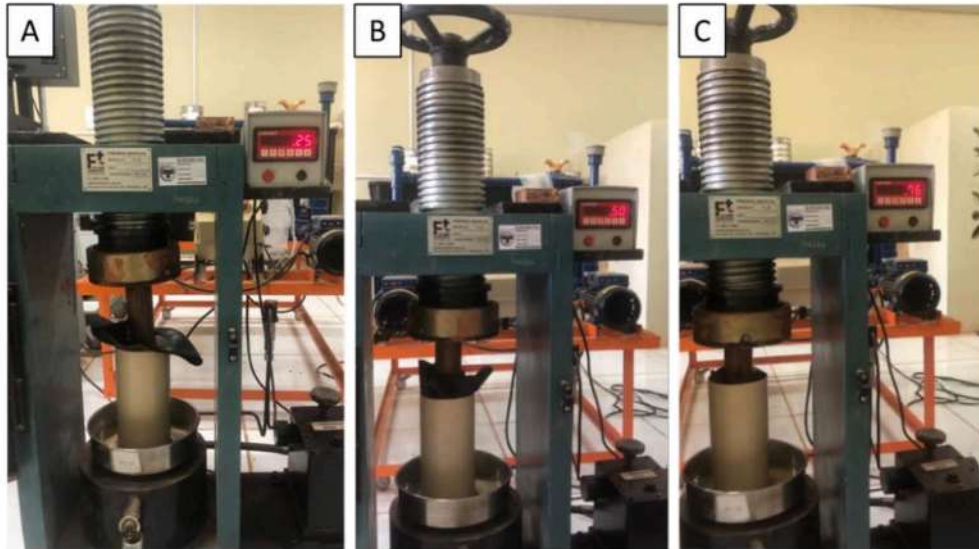
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

### 5.3 APLICAÇÃO DE CONSOLIDAÇÃO MECÂNICA ACELERADA

A Figura 22 ilustra o esquema montado para aplicação das forças no sistema para a consolidação mecânica do rejeito de bauxita. Observa-se que foi possível realizar ensaios preliminares, de compressão da polpa com diferentes concentrações de sólidos.

Figura 22 - Aplicação de força no sistema para consolidação mecânica do rejeito: Aplicação de 0,25 tf (A),

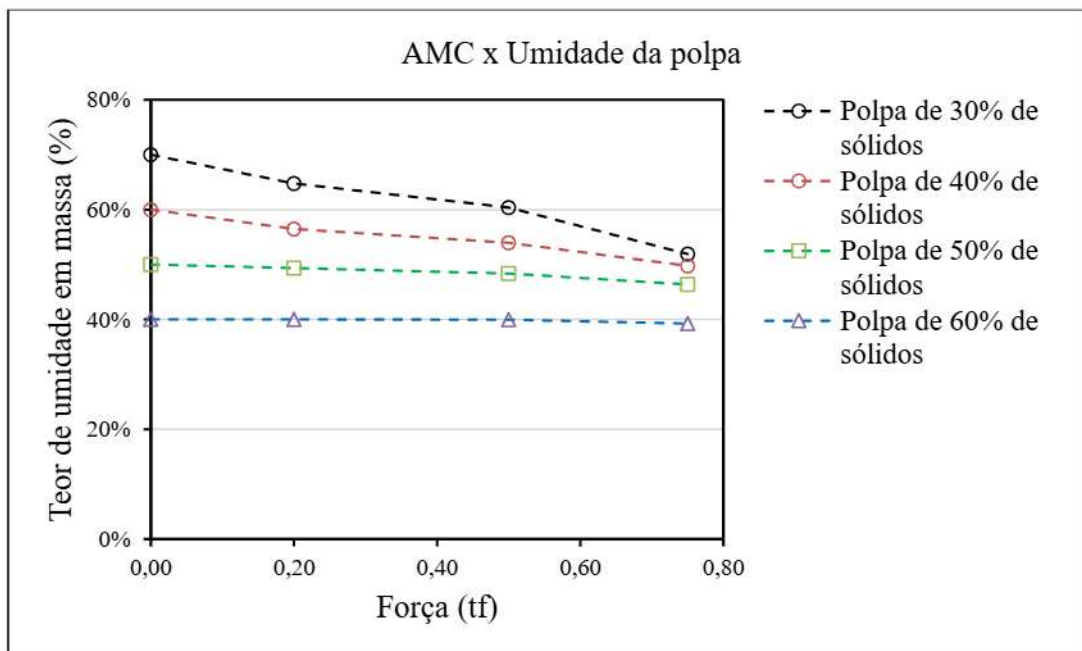
Aplicação de 0,50 tf (B) e Aplicação de 0,75 tf (C)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 23 mostra a variação da umidade das amostras em função da força aplicada.

Figura 23 - AMC x Umidade da polpa



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Ao aplicar força sobre a amostra, ocorre um rearranjo das partículas no interior do protótipo. Esta tensão efetiva, distribuída entre as partículas, provoca a compactação do rejeito. Adicionalmente, sob a influência desta tensão, a água permeia pelo solo em busca de um ponto de alívio, até ser expelida para fora da polpa. À medida que a compactação do rejeito avança, a

porosidade da amostra diminui, o que resulta em uma redução da permeabilidade do material, uma vez que as partículas se reagrupam diminuindo os porosidade entre elas, dificultando o processo de desaguamento da polpa. Além disso, melhores resultados foram encontrados para os ensaios com pressões maiores.

As polpas com 50% e 60% de sólidos em massa não exibiram uma redução significativa de umidade, pois, ao compactar o material, a diminuição da permeabilidade das amostras impediu a efetiva remoção da água. A polpa com 40% de sólidos apresentou uma redução de aproximadamente 10% em sua umidade devido ao processo de desaguamento. Em contraste, a polpa com 30% de sólidos demonstrou uma recuperação de cerca de 20% da água retida em seu interior, o que expressa um grande volume de água recuperada dentro do processo.

## CONCLUSÃO

Os ensaios de sedimentação realizados em provetas demonstraram que a polpa espessada, durante o processo de sedimentação natural na lagoa de transição e na lagoa de disposição, apresenta um teor de sólidos em massa de aproximada de 43% e um teor de umidade em massa de aproximadamente 57%.

Com base nos estudos realizados neste trabalho, verificou-se que a implementação do método de aceleração mecânica consolidado no processo em questão pode ser viável para a recuperação de parte da água retida no rejeito espessado na lagoa de disposição, dado que aproximadamente 57% da massa desse rejeito é composta por umidade. No entanto, a aplicação desse método deve ser iniciada apenas quando a polpa despejada atingir um teor de pelo menos 30% de sólidos, condição que assegura a maior eficiência no desaguamento. Concentrações superiores a 50% tornam o processo difícil devido à baixa quantidade de água removida (4% para polpas com teor de 50% de sólidos e 1% para polpa com teor de 60% de sólidos). Melhores resultados foram encontrados com aplicações de forças na ordem de 0,75 tf.

Além da reutilização da água sobrenadante e da recuperação de aproximadamente 20% da água retida na camada espessada, a aplicação do método de aceleração mecânica consolidada (AMC) pode também resultar em um aumento de 20% na concentração de sólidos na polpa depositada, permitindo novos arranjos operacionais.

Conclui-se que o processo de consolidação mecânica acelerada pode ser promissor para a gestão de rejeitos de bauxita, oferecendo benefícios em termos de recuperação de água e eficiência operacional, com implicações positivas para a redução dos custos e do impacto ambiental relacionado à disposição de rejeitos.

Associada à viabilidade econômica do processo, observa-se a redução da complexidade no monitoramento e na construção de novos reservatórios para a disposição de resíduos, o que diminui a necessidade de investimentos significativos e a supressão de novas áreas. Essa integração resulta em uma gestão de resíduos mais consciente, contribuindo para o estabelecimento de um ciclo produtivo mais sustentável, responsável e menos burocrático.

Este método pode ser aplicado em células fixas para o lançamento periódico de rejeito. Após a recirculação da água sobrenadante e a recuperação da água retida na camada espessada, a polpa, ao atingir uma concentração de sólidos adequada, seria retirada mecanicamente e depositada em pilhas ou em fundos de cava. Dessa forma, seria possível evitar a construção sucessiva de novas lagoas para a disposição de material, uma vez que, após a remoção completa do rejeito, a célula ficaria disponível para um novo ciclo de disposição.

Porém, ainda se faz necessário estudos visando entender o processo de AMC com rejeito de bauxita, por exemplo, como a espessura da camada de rejeito afeta a recuperação de água, qual o efeito da geometria do equipamento e pressão aplicada na superfície e quais os ganhos estão atrelados às tensões de cisalhamento aplicada pelo parafuso do equipamento na polpa depositada.

## REFERÊNCIAS

ABAL - Associação Brasileira do Alumínio. **Relatório Anual de 2019**. São Paulo: ABAL, 2019.

ABAL - Associação Brasileira do Alumínio. **Relatório Anual de 2023**. São Paulo: ABAL, 2023.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Peneiras para ensaio com tela de tecido metálico** – NBR 5734, 1997.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Solos e rochas** – NBR 6502, 1995.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. **Solo - Análise granulométrica** – NBR 7181, 2018.

ALMEIDA, J; MAGRO, C. P; MATEUS, E; RIBEIRO, A. B. **Life Cycle Assessment of Electrolytic Technologies to Recover Raw Materials from Mine Tailings. Sustainability**, v. 13, n. 7, p. 3915, 2021

ALVES, L. P. **Mapeamento das frentes de lavra da mina de bauxita de juruti – PÁ**. Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará. Instituto de Geociências e engenharias. Marabá, 2015.

ALCOA WORLD ALUMINA. **PAEBM - Sistema de disposição de rejeitos (LE e LD's 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8)**. Mina de bauxita de Juruti. Walm engenharia. Município de Juruti, Pará, 2024.

ALCOA WORLD ALUMINA. **Plano Integrado de Aproveitamento Econômico (PAE)**. 2009.

BIONDI, J. C. **Processos Metalogenéticos e os Depósitos Minerais Brasileiros**. São Paulo: Oficina de Textos, 2004.

CABRERA, F. E. H. **Assessment of farming method applied to bauxite residue using a**

**laboratory model.** The University of Queensland. BSc Construction Engineering. School of Civil Engineering, Australia, 2019.

CRUZ, R. C. A.: **Análise da disposição de rejeito a seco relacionada ao projeto, estruturas de empilhamento e métodos de desaguamento do rejeito.** Dissertação de mestrado. Mestrado Profissional em Engenharia Mineral. Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, 2023.

DAS, B. M. **Fundamentos de engenharia geotécnica** / In: Das, B. M. Tradução: All tasks. Thomson Learning. 562 f. 6º edição. São Paulo, 2007.

FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G. **Tratamento de minério: separação sólido líquido.** 6ª. Ed. Rio de Janeiro: CETEM, 2018. p. 597-600.

FERREIRA, L. D. **Desenvolvimento de Equipamento de Laboratório para Estudo de Fenômenos Eletro cinéticos no Processo de Adensamento de Resíduos de Mineração.** Ouro Preto. 2011.

FITTON, T. G; SEDDON, K. D. 2013. **Paste and thickened tailings – myth busting and clarification,** in RJ Jewell, AB Fourie, J Caldwell and J Pimenta (eds), Proceedings of the 16th International Seminar on Paste and Thickened Tailings, Australian Centre for Geomechanics, Perth, pp. 37–46. 2013.

GANCEV, R. K. **Concentração de bauxita por flotação reversa.** Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, São Paulo, 2009.

GIRODO, A. C.; MARTINS P. C. P.; NUNES, N. Q.; LE, J. A.; SANTIM, A. W.; RODRIGUES, E. L.; PROENÇA, R. A.; REIS, A. O.; PINTO, L. C. N.; ARTHUSO, V.; VOLPE, M. C. G.; RHEIN, F. J.; PAES, M. A. P. **Plano de Aproveitamento Econômico, Projeto Juruti.** Omnia Minérios Ltda e Sênior Engenharia, Juruti, 2005.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Juruti-PA.** Disponível: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pa/juruti.html>. Acesso no dia 31 ago. de 2024

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração. **Gestão e Manejo de Rejeitos da**

**Mineração/Instituto Brasileiro de Mineração;** organizador, Instituto Brasileiro de Mineração. 1.ed. - Brasília: IBRAM, 2016.

**KOTSCHOUBEY, B. Principais Depósitos Mineraiis do Brasil – Departamento Nacional de Produção Mineral.** Brasília: 1988.

Kynch. **A theory of sedimentation.** Trans. Faraday Society, no 48, 1952, p.166.

MUNRO, D. L; SMIRK, D. D. **How thick is thick enough?.** in Paste 2018 – RJ Jewell and AB Fourie (eds). Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2018.

OMNIA MINÉRIOS. **Plano Integrado de Aproveitamento Econômico.** Projeto Juruti. 2005.

PAIVA, M. K. N. **Diagnostico e simulação da usina de beneficiamento de bauxita da mina de Juruti/PA.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo. São Paulo, 2019.

PEIXOTO, C. L. P. **Proposta de nova metodologia de desaguamento de rejeitos em polpa** Dissertação de mestrado. Mestrado Profissional em Engenharia Geotécnica. Universidade Federal de Ouro Preto, UFOP, 2012.

PEREIRA, G. A. **Caracterização e classificação de resíduos sólidos em instituições de ensino superior:** um estudo de caso no Centro de Ciências Exatas e Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos. 2019. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2019.

PHIBION. **Mudmaster.** Phibion Pty Ltd, Austrália, 2015.

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\\_Mineraçao\\_de\\_Bauxita.pdf/399bb52a-90df-5b2a-e634-b06ecb1e3008?version=1.0](http://antigo.mme.gov.br/documents/36108/448620/P11_RT22_Perfil_da_Mineraçao_de_Bauxita.pdf/399bb52a-90df-5b2a-e634-b06ecb1e3008?version=1.0) > Acesso em 03 mar. 2009.

QUISPE, L. M. C. **Consolidação de um rejeito de mineração de areia e modelação de enchimento de um reservatório para sua disposição.** Dissertação de mestrado. Mestrado

Profissional em Geotecnia, Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2011.

ROCHA, F.S. **Análise das propriedades físicas do rejeito de bauxita como insumo para a fabricação de tijolos solo cimento.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Minas) – Universidade Federal do Oeste do Pará, Campus Universitário de Juruti, 2023.

RÖHRLICH, M.; MISTRY, M.; RUHRBERG, M.; MARTENS, P. N. **Bauxite mining in Brazil, different viewpoints concerning environmental and sustainable development.** VI SMMT/XVIII ENTMM – Rio de Janeiro, 2001.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A.; BRAGA, P. F. A. **Tratamento de Minérios. Práticas Laboratoriais.** Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2014.

SANTOS, R. S. **Formulação de tintas e elaboração de paleta de cores a partir do rejeito de bauxita.** Universidade Federal do Oeste do Pará. Juruti, 2024.

SILVA, J. M. P; SILVA, C. N; **Juruti: uma comunidade amazônica atingida pela mineração.** GEOgraphia, Belém, 2016.

SILVA, M. L. M. C; OLIVEIRA, S. M. B. **Caracterização Mineralógica e Química das Bauxitas de Nazaré Paulista (São Paulo).** Revista Brasileira de Geociências. 22 (1): 93-99, mar. 1992.

SOARES, L. **Barragem de rejeitos.** Centro de Tecnologia Mineral. Ministério de Ciência e Tecnologias. Rio de Janeiro, 2010.

SOUZA, J. C. **Métodos de Lavra a Céu Aberto.** Apostila da disciplina métodos de lavra a céu aberto, UFPE. Recife, 2001

TINOCO, C. P. **Caracterização Geomecânica de um Rejeito de Mineração de Bauxita.** Dissertação de Mestrado. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo (SP), 2017.

WILLAN, M. B.; GHATAORA, G. S. **Management of bauxite residue in a temperate climate using mud-farming techniques.** Australian Centre for Geomechanics, Perth, 2015.

YAO, Y. **The effect of flocculent on the geotechnical properties of mature fine tailings.** in D Segoo, GW Wilson and N Beier (eds), Proceedings of the 3rd International Oil Sands Tailings Conference, Oil Sands Tailings Research Facility, Calgary, pp. 391–398. 2012.