

CAMILA BOTARRO MOURA

**AVALIAÇÃO DE CENTRÍFUGAS DECANTER PARA
DESAGUAMENTO DE REJEITO DO BENEFICIAMENTO DE BAUXITA**

São Paulo

2024

CAMILA BOTARRO MOURA

**AVALIAÇÃO DE CENTRÍFUGAS DECANTER PARA
DESAGUAMENTO DE REJEITO DO BENEFICIAMENTO DE
BAUXITA**

Versão Corrigida

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do título de
Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia
Mineral

Orientador: Prof. Dr. Arthur Pinto Chaves

São Paulo

2024

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 18 de JANEIRO de 2024

Assinatura do autor:



Assinatura do orientador:



Catálogo-na-publicação

MOURA, CAMILA BOTARRO
AVALIAÇÃO DE CENTRÍFUGAS DECANTER PARA DESAGUAMENTO
DE REJEITO DO BENEFICIAMENTO DE BAUXITA / C. B. MOURA -- versão
corr. -- São Paulo, 2024.
74 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São
Paulo. Departamento de Engenharia de Minas e de Petróleo.

1.Bauxita 2.Separação Sólido Líquido 3.Desaguamento 4.Rejeitos
5.Centrífuga I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento
de Engenharia de Minas e de Petróleo II.t.

Á minha família e amigos, pelo incentivo e apoio.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, que me deram todo o suporte e possibilitaram que eu chegasse até aqui.

Agradeço ao Rafael, fonte de inspiração e incentivo para finalizar este trabalho. Obrigado por ouvir e me aconselhar durante todo o desenvolvimento.

Agradeço ao professor Dr. Arthur Pinto Chaves, pelo ensinamento concedido, pelo exemplo, dedicação e orientação durante não só o mestrado, mas na minha carreira como Engenheira de Minas.

Agradeço a todos os amigos que direta ou indiretamente me acompanharam no desenvolvimento desse trabalho: Renata, Rossi, Larissa, Pâmela, Ana Claudia, entre tantos outros.

Agradeço à Companhia Brasileira de Alumínio pela oportunidade de realizar este mestrado e por todo o suporte oferecido durante sua realização. Em especial à Fabiana, Aroldo e Ana Íris, que me acompanharam na realização de todas as coletas e ensaios.

“Eu quero ser tudo que sou
capaz de me tornar”
(Katherine Mansfield)

RESUMO

Com os desafios enfrentados pela mineração, especialmente em questões relacionadas à redução de consumo e recuperação de água, disposição de rejeitos e gerenciamento ambiental, é de suma importância o estudo de métodos de desaguamento que reforcem a sustentabilidade da atividade mineral. Dependendo da qualidade do minério durante o beneficiamento de bauxita, toneladas de rejeito são geradas e dispostas principalmente em barragens. Estas frações têm alta umidade e grandes quantidades de caulinita, mineral muito fino e de difícil sedimentação, o que dificulta ainda mais o desaguamento deste material. Neste cenário enquadra-se este trabalho, que visa analisar a opção de desaguamento do rejeito do beneficiamento de bauxita da Zona da Mata mineira utilizando centrífugas do tipo decanter, possibilitando um maior entendimento sobre o comportamento desse material durante o desaguamento e a investigação dos efeitos de vários parâmetros do processo na recuperação de sólidos e concentração de sólidos nos fluxos, com base em ensaio de laboratório e ensaio em escala piloto utilizando três diferentes equipamentos. Os resultados indicaram que centrífugas decanter podem ser utilizadas para atingir alta concentração de sólidos na fase sólida (torta) para o material estudado, com valores variando de 60% a 80% de sólidos por massa, e uma ótima clarificação na fase líquida (clarificado) de 0 a 6% de sólidos por massa, valores que tornam possível o reaproveitamento dessa fase no circuito de processamento. Adicionalmente, o presente trabalho proporciona uma melhor compreensão de como diferentes concentrações de sólidos na alimentação podem afetar o comportamento do equipamento.

Palavras-chave: Bauxita. Separação Sólido-Líquido. Desaguamento. Rejeitos. Centrífugas.

ABSTRACT

The challenges faced by mining, especially in issues related to reducing water consumption and recovery, tailings disposal and environmental management, it is extremely important to study dewatering methods that reinforce the sustainability of mining activities.

Depending on the ore quality during bauxite processing, tons of tailings are generated and disposed mainly in dams. These fractions have high moisture and large amounts of kaolinite, a very fine mineral that is difficult to settle, which makes dewatering this material even more difficult. This work fits into this scenario, which aims to analyze the option of dewatering the tailings from bauxite processing from Minas Gerais using decanter centrifuges, enabling a greater understanding of the behavior of this material during dewatering and investigating the effects of various process interruptions in solids recovery and concentration, based on laboratory testing and pilot-scale testing using three different equipments. The results indicated that the decanter centrifuge can be used to achieve a high concentration of solids in the solid phase (cake), with values ranging from 60% to 80% solids by weight, and an excellent clarification in the liquid phase (centrate) from 0 to 6% solids by weight, values that make it possible to reuse this phase in the processing circuit. Furthermore, the present work provides a better understanding of how different concentrations of solids in the feed can affect the behavior of the equipment.

Keywords: Bauxite. Solid-Liquid Separation. Dewatering. Tailings. Centrifuges.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Publicações envolvendo impactos causados pela indústria do alumínio nos últimos 40 anos	14
Figura 2. Depósitos de bauxita pelo mundo	17
Figura 3. Distribuição das reservas de bauxita no Brasil.....	19
Figura 4. Bauxita no transportador de correia em usina de beneficiamento	21
Figura 5. Diferença entre os tipos de espessadores	25
Figura 6. Representação de um filtro prensa	26
Figura 7. Corte esquemático de uma centrífuga decanter	27
Figura 8. Operação da centrífuga decanter.....	28
Figura 9. Força de deslizamento na praia de uma centrífuga decanter	31
Figura 10. Lipari – Mina de Diamante Braúna	33
Figura 11. Buenaventura – Mina de Ouro e Prata.....	34
Figura 12. Southern Copper – Mina de Cobre.....	35
Figura 13. Bauxita disposta a úmido após processo de beneficiamento em Miraf-MG	36
Figura 14. Alternativas para disposição de rejeito em pasta semiúmida	38
Figura 15. Empilhamento de rejeito a seco	39
Figura 16. Centrífuga de laboratório.....	41
Figura 17. Planta piloto de beneficiamento de bauxita.....	43
Figura 18. Fluxograma de processos da Planta Piloto	44
Figura 19. Balança Marcy com recipiente utilizados na determinação de densidade de polpas e porcentagem de sólidos.....	46
Figura 20. Fluxograma de processos da Planta Piloto com indicativo dos pontos de amostragem	47
Figura 21. Distribuição granulométrica do rejeito desaguado da Zona da Mata	48
Figura 22. Amostra centrifugada após 30 segundos, sem floculante e com floculante	49
Figura 23. Concentração de sólidos nos fluxos durante ensaios piloto com o Equipamento 1	52
Figura 24. Concentração sólidos na alimentação da centrífuga – Equipamento 1....	53
Figura 25. Concentração de sólidos na torta – Equipamento 1	54
Figura 26. Concentração de sólidos no clarificado – Equipamento 1	54
Figura 27. Recuperação de sólidos na centrífuga – Equipamento 1	55
Figura 28. Fração de sólidos desaguada após ensaios com o Equipamento 1	56
Figura 29. Concentração de sólidos nos fluxos de operação com o Equipamento 2	58
Figura 30. Concentração sólidos na alimentação da centrífuga – Equipamento 2....	58
Figura 31. Concentração sólidos na torta – Equipamento 2.....	59
Figura 32. Concentração sólidos no clarificado – Equipamento 2.....	60
Figura 33. Recuperação de sólidos na centrífuga – Equipamento 2	61
Figura 34. Fração de sólidos desaguada após ensaios com Equipamento 2	61
Figura 35. Concentração de sólidos nos fluxos de operação – Equipamento 3.....	63

Figura 36. Concentração sólidos na alimentação – Equipamento 3.....	63
Figura 37. Concentração sólidos na torta – Equipamento 3.....	64
Figura 38. Concentração sólidos no clarificado – Equipamento 3.....	64
Figura 39. Recuperação de sólidos na centrífuga – Equipamento 3.....	65
Figura 40. Fração de sólidos desaguada após ensaios com o Equipamento 3	65
Figura 41. Concentração de sólidos na alimentação – Equipamentos 1, 2 e 3.....	66
Figura 42. Concentração de sólidos na torta – Equipamentos 1, 2 e 3.....	67
Figura 43. Concentração de sólidos no clarificado – Equipamentos 1, 2 e 3.....	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Detalhes sobre os métodos construtivos	37
Tabela 2. Características geométricas dos equipamentos testados em escala piloto	45
Tabela 3. Variáveis operacionais durante os ensaios	50
Tabela 4. Valores de concentração de sólidos para o Equipamento 1.....	51
Tabela 5. Valores de concentração de sólidos para o Equipamento 2.....	57
Tabela 6. Valores de concentração de sólidos para o Equipamento 3.....	62

SUMÁRIO

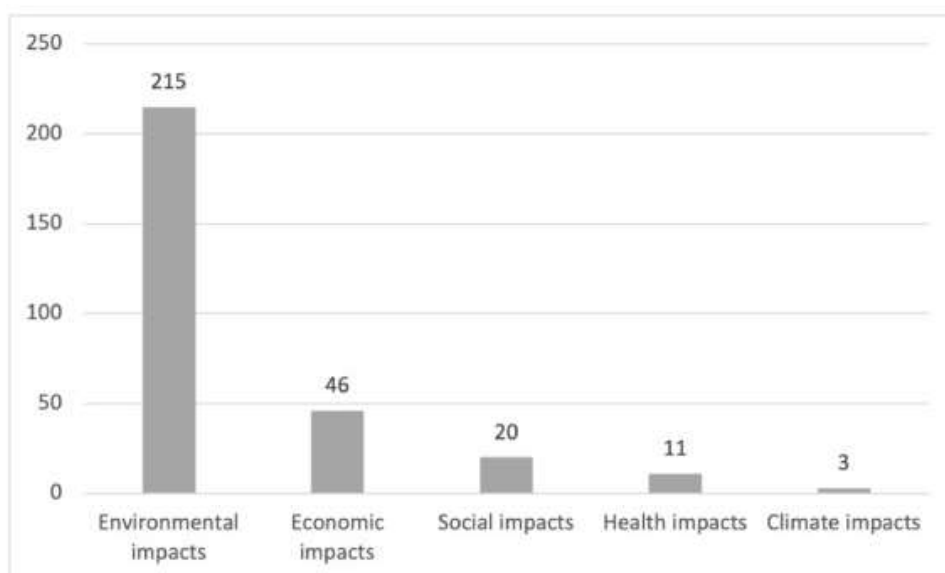
1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS E JUSTIFICATIVA.....	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	BAUXITA.....	16
3.1.1	OCORRÊNCIA E GÊNESE.....	16
3.1.2	BAUXITAS BRASILEIRAS.....	18
3.1.3	PROCESSO DE BENEFICIAMENTO	20
3.2	SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO.....	22
3.2.1	DESAGUAMENTO	23
3.2.2	EQUIPAMENTOS DE SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO.....	23
3.3	DISPOSIÇÃO DE REJEITOS.....	35
3.3.1	DISPOSIÇÃO A ÚMIDO	36
3.3.1	DISPOSIÇÃO SEMI-ÚMIDA	37
3.3.2	DISPOSIÇÃO A SECO	38
4	MATERIAIS E MÉTODOS	39
4.1	PROCEDIMENTOS ANTERIORES À AMOSTRAGEM.....	40
4.2	CARATERIZAÇÃO TECNOLÓGICA.....	40
4.3	ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	41
4.4	ENSAIOS PILOTO	42
4.4.1	PLANTA PILOTO DE BENEFICIAMENTO DE BAUXITA.....	42
4.4.2	CENTRÍFUGAS DECANTER PILOTO.....	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	48
5.1	CARATERIZAÇÃO TECNOLÓGICA.....	48
5.2	ENSAIOS DE LABORATÓRIO.....	49
5.3	ENSAIOS PILOTO	50
5.3.1	ENSAIOS PILOTO COM O EQUIPAMENTO 1	51
5.3.2	ENSAIOS PILOTO COM O EQUIPAMENTO 2	56
5.3.3	ENSAIOS PILOTO COM O EQUIPAMENTO 3	62
5.3.4	COMPARAÇÃO DE RESULTADOS – EQUIPAMENTOS 1, 2 E 3	66
6	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	69

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	71
---	-----------

1 INTRODUÇÃO

A produção de alumínio acarreta uma série de impactos, incluindo impactos ambientais, tais como emissões de gases, emissão de poeira, alterações na paisagem e na ecologia, alguns resultantes da extração da bauxita (HANSEN et al., 2023). A Figura 1 apresenta o número de publicações, entre 1983 e 2023, referentes à indústria de alumínio e seus principais impactos. Pode-se perceber que os impactos ambientais, nos quais se enquadram a produção de rejeitos e a disposição dos mesmos, estão em maior número, seguido pelos impactos econômicos.

Figura 1. Publicações envolvendo impactos causados pela indústria do alumínio nos últimos 40 anos



Fonte: Hansen et al., 2023

Na indústria da mineração, primeira etapa no processo de produção de alumínio, a escala de geração de rejeitos pode ser imensa, e seu armazenamento e manuseio podem ser um problema ambiental se não gerenciados de maneira adequada (KLUG, SCHWARZ, 2019). Como consequência, rejeitos são dispostos a úmido todos os anos em barragens de rejeito ou lagoas de disposição, que podem apresentar alto grau de risco e elevado custo de implantação. Como exemplo, na lavra de bauxita da Zona da Mata em Minas Gerais, grosso modo, para cada tonelada de bauxita beneficiada é gerada outra tonelada de rejeito, gerando grande impacto ambiental.

Devido aos impactos negativos causados pelas barragens de rejeito e às novas legislações vigentes no Brasil, a busca por uma forma de disposição mais sustentável e métodos alternativos de desaguamento tem sido objeto de estudo nos últimos anos. Após ser submetido a uma etapa de desaguamento, o material pode ser empilhado a seco (“*dry stacking*”) ou também ser usado como enchimento em áreas que já foram lavradas, a depender de alguns fatores como o método de lavra e área disponível.

O tratamento das partículas finas encontradas nesse rejeito, no caso da bauxita, vem se constituindo num grande desafio, dado que com o decréscimo do tamanho das partículas, começa a diminuir a ação das forças de caráter mecânico sobre as mesmas, passando a tornar significativas as forças referentes a fenômenos eletrostáticos e aquelas devidas à descontinuidade do meio (LUZ et al., 2010).

E com a busca por novos métodos de disposição, as centrífugas, especificamente as do tipo decanter, são considerados equipamentos versáteis e tem sido tradicionalmente utilizadas em indústrias como a alimentícia, farmacêutica, petroquímica, saneamento, entre outras. Na indústria mineral, geralmente são usadas quando a sedimentação por gravidade é muito lenta ou quando se deseja reduzir a quantidade de água na fase adensada (CHAVES, 2013).

2 OBJETIVO

O presente trabalho tem por objetivo avaliar o comportamento do rejeito da bauxita proveniente dos depósitos da Zona da Mata mineira com base em suas características tecnológicas e seu desempenho durante o desaguamento em centrífugas do tipo decanter, confirmando a viabilidade técnica do equipamento a partir de resultados de ensaio de laboratório e de ensaios em planta piloto considerando diferentes equipamentos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 BAUXITA

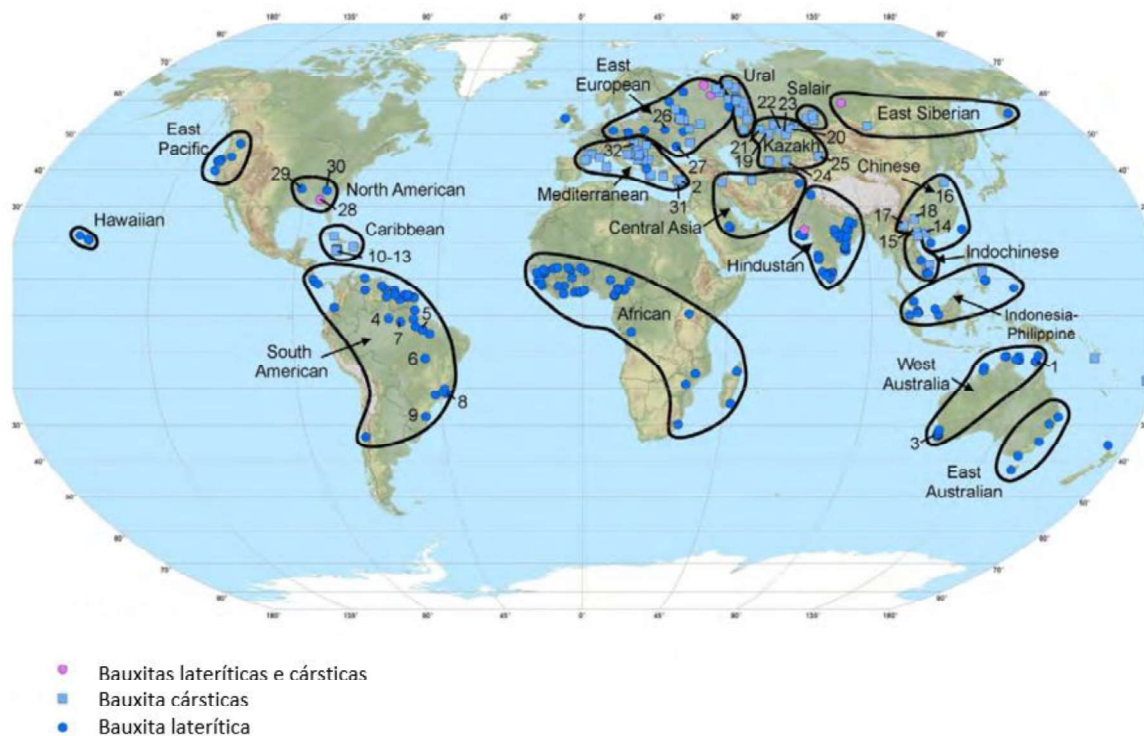
3.1.1 OCORRÊNCIA E GÊNESE

O minério de alumínio, ou simplesmente bauxita, foi descoberto em 1821 por Pierre Berthier, em Les Baux, no sul da França. Compreende um grupo de minerais contendo diversos óxidos de alumínio e pode ser compacto (maciço), coeso ou não-coeso, terroso ou argiloso, com cores variando de vermelho, violeta, amarelo, marrom e até branco devido à proporção de óxidos de ferro (SANTOS, 2011). São bastante singulares no que diz respeito à diversidade de origens, feições, composições e modos de ocorrência, formando-se nas mais diversas condições geológicas e nas mais diversas rochas (CARVALHO, 1989).

As bauxitas podem ser encontradas em dois tipos principais: (1) bauxita laterítica e (2) bauxita cárstica. As bauxitas lateríticas são principalmente rochas de silicato de alumina, enquanto as bauxitas cársticas são provenientes de rochas carbonáticas e de silicato de alumina intercaladas (BHUKTE et al., 2017).

A bauxita laterítica é a encontrada em maior proporção na crosta terrestre, totalizando cerca de 85% dos depósitos, e até hoje é o único tipo de bauxita que ocorre no Brasil, conforme apresentado pela Figura 2. Os primeiros depósitos descobertos ao sul da França e na Europa central estavam associados a rochas carbonáticas, posteriormente, em regiões tropicais foram encontrados materiais ricos em alumínio sobre rochas ígneas e metamórficas e na forma de depósitos sedimentares (CARVALHO, 1989).

Figura 2. Depósitos de bauxita pelo mundo



Fonte: Modificado de Schulte and Foley, 2014

De acordo com Sampaio et al., 2008, a condição que é essencial para a formação da bauxita é a existência de um clima tropical, considerando uma temperatura média anual maior que 20 °C, estações secas e úmidas de forma alternada, o que favorece o processo natural de lixiviação. Desta forma, silicatos e argilominerais são decompostos, há remoção da maior parte da sílica, enquanto os óxidos de alumínio e ferro são concentrados.

Dessa forma, obtém-se maior taxa de formação de bauxita quando temos a ocorrência:

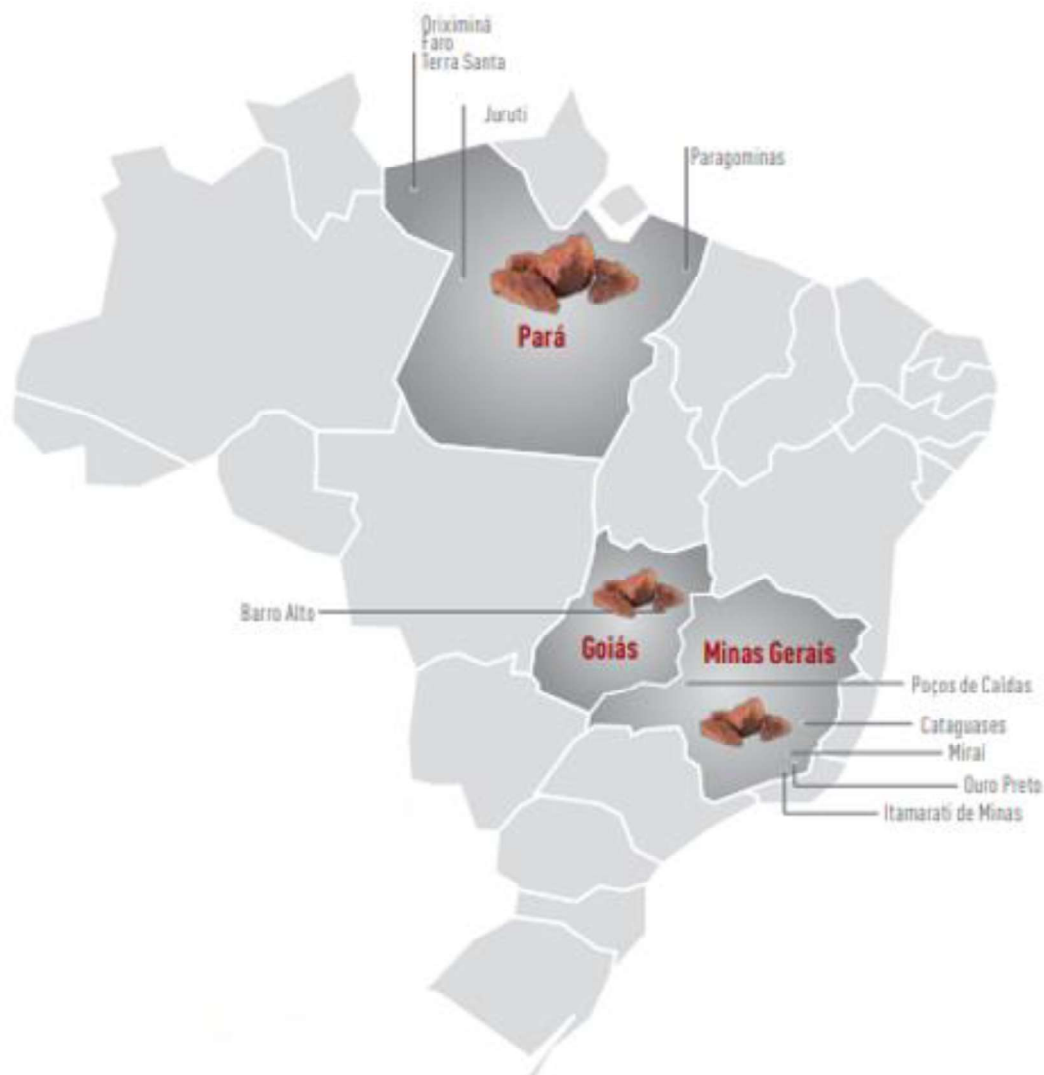
- Alta porosidade na rocha;
- Cobertura vegetal com adequada atividade bacteriológica;
- Topografia plana ou, pelo menos, pouco acidentada que permita o mínimo de erosão;
- Longo período de estabilidade e intensa alteração das condições climáticas, principalmente, as estações seca e úmida.

3.1.2 BAUXITAS BRASILEIRAS

Em 2017, a produção mundial de bauxita alcançou 302,6 Mt, quantidade superior à observada no ano anterior, de 279,3 Mt. A Austrália segue como o maior produtor mundial, com 83,0 Mt, seguida da China, com 68,0 Mt. A produção brasileira apresentou uma pequena redução, com uma variação de -3,8% em relação a 2016, totalizando 36,3 Mt no ano de 2017, indo do terceiro para o quarto maior país produtor. O destaque no ranking dos maiores produtores mundiais, em 2017, foi na Guiné, que produziu cerca de 45,0 Mt neste ano (ANM, 2019).

A localização das reservas brasileiras de bauxita é apresentada pela Figura 3, com manifestação nos estados do Pará, Minas Gerais e Goiás. O estado do Pará é onde concentra-se 91% da bauxita para fins de uso metálico no país (ABAL, 2017).

Figura 3. Distribuição das reservas de bauxita no Brasil



Fonte: Relatório ABAL, 2017

Os depósitos de bauxita da região sudeste de Minas Gerais, foco deste trabalho, constituem-se em um cinturão de direção NE que se inicia em São João Nepomuceno-MG e que se prolonga até Espera Feliz-MG, com interrupções principalmente nos vales dos rios Pomba e Muriaé. Os depósitos de bauxita desta região ocorrem de modo sistemático nos topos e nas encostas superiores dos morros meia-laranja, enquanto nas encostas inferiores e nas baixadas aparecem os materiais mais argilosos e areno-argilosos (CARVALHO, 1989).

3.1.3 PROCESSO DE BENEFICIAMENTO

A bauxita é a única matéria-prima para a produção do alumínio, e seu beneficiamento é a primeira etapa do processo de produção do metal. Embora exista quantidade suficiente de minério de bauxita em todo o mundo, as reservas de minério de boa qualidade são limitadas, e sua qualidade varia muito de região para região e de país para país.

A bauxita consiste em óxido de alumínio hidratado na forma mineral de gibbsita, bohemita e diásporo com uma quantidade significativa de impurezas como sílica, ferro, titânio e outros minerais em menores proporções. Essas impurezas criam problemas de qualidade, reduzem o rendimento durante o processo de beneficiamento, aumentam os custos de produção e causam preocupações ambientais ao gerar grandes volumes de rejeito. O problema é ainda agravado devido ao esgotamento contínuo de minérios de alto teor (BANERJEE et al., 2023).

O principal objetivo do beneficiamento de bauxita é a adequação da granulometria, elevação do teor de alumina aproveitável e redução do teor das impurezas, principalmente a sílica reativa, a impureza mais danosa ao processo de metalurgia extrativa. Como os finos do minério concentram a fonte de sílica reativa, geralmente argilominerais, os processos de beneficiamento consistem em lavagem e classificação, de forma a descartar as frações mais finas. Os métodos de beneficiamento geralmente utilizados são britagem, desagregamento e peneiramento para remoção da fração argilosa e dos minerais de sílica. Podem também incluir etapas de concentração de espécies minerais indesejadas, como por exemplo óxidos de ferro e/ou de titânio. Nestes casos, utilizam-se métodos de concentração densitários ou magnéticos.

Dependendo de aspectos econômicos e logísticos, o minério é secado para facilitar o manuseio e/ou minimizar os custos de transporte, podendo ser usado tanto no processo de calcinação, na bauxita para fins não metalúrgicos, quanto no processo Bayer com a bauxita para fins metalúrgicos, que constitui a quase totalidade do seu consumo (SAMPAIO et al., 2008).

Neste contexto, a bauxita brasileira deve passar por um processo de beneficiamento em usinas de tratamento de minério, a exemplo do ilustrado na Figura 4, e esta operação divide a sua alimentação em duas partes, caracterizando-se como produto a fração mais grossa e como rejeito a fração mais fina (ou ultrafina em alguns casos).

Figura 4. Bauxita no transportador de correia em usina de beneficiamento



Fonte: Relatório interno CBA, 2019

A fração que não é economicamente viável dentro do processo de beneficiamento de bauxita é denominada rejeito e é rica em caulinita, com distribuição granulométrica fina e geralmente apresentando-se na forma de polpa diluída com concentração de sólidos que pode variar conforme o processo de beneficiamento ao qual a bauxita foi submetida.

O rejeito é uma mistura heterogênea com sólidos suspensos em água. A caracterização desses sólidos em rejeitos minerais é frequentemente considerada em termos de granulometria, mineralogia e morfologia. Todos os três fatores e suas interações com as espécies aquosas contribuem diretamente para o comportamento de cada polpa (VAN DEURSEN, 2016).

3.2 SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO

O processo de separação sólido-líquido engloba todas as operações unitárias as quais incluem o desaguamento, evaporação e secagem do minério. No desaguamento, apenas métodos mecânicos são empregados, enquanto na evaporação e secagem utiliza-se o calor (VALADÃO, 2008).

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 demanda por água tem se tornado uma importante preocupação no setor mineral, especialmente em termos de conservação, tratamento e reuso. Neste contexto, as operações de desaguamento ganham maior importância, sendo consideradas essenciais em uma etapa de beneficiamento mineral, porque, além da complexidade de algumas operações de separação, têm-se também os elevados investimentos de capital e manutenção associados aos equipamentos utilizados (FRANÇA, MASSARANI, 2018).

No caso de suspensões/polpas minerais contendo partículas menores do que 10 μm , especialmente na fração de argila ($<2 \mu\text{m}$), o processo de separação entre sólidos e líquidos é extremamente afetado pelo efeito da dispersão das partículas, causado pelo movimento browniano característico dos coloides, o qual dificulta a sedimentação. Além disso, deve-se atentar para a consideração de que quanto mais finas as partículas da polpa a ser tratada, menores serão a capacidade e a eficiência da separação e mais restrita será a escolha do equipamento (LUZ et al., 2010).

Segundo Guimarães, 2011, as operações de separação sólido-líquido estão usualmente relacionadas com:

- Recuperação de água para reutilização no processo;
- Adequação do percentual de sólidos da polpa exigida pelas operações unitárias subsequentes;
- Redução da umidade dos produtos para transporte e comercialização; e
- Preparação de rejeitos visando transporte e disposição.

3.2.1 DESAGUAMENTO

O processo de desaguamento é uma operação que visa reduzir a umidade de produtos de outras operações unitárias de tratamento de minérios para sua utilização final ou para atingir as condições exigidas pelas operações unitárias subsequentes (CHAVES, 2013).

Os métodos de desaguamento podem ser classificados de duas formas, segundo Chaves, 2013:

- Pelo movimento relativo das fases: o sólido move-se através do líquido em repouso, o que se denomina decantação, e cujo exemplo mais marcante é o espessamento; ou o líquido move-se através de uma fase estacionária, como ocorre na drenagem de pilhas ou silos, ou, ainda, em peneiras;
- Pela utilização de forças auxiliares à separação: neste item se enquadram os filtros e as centrífugas decanter.

Devido à granulometria muito fina do rejeito de beneficiamento de bauxita (argilominerais), o desaguamento em filtros a vácuo ou filtros prensa torna-se problemático, com as áreas de filtragem demandadas muito grandes e a umidade residual muito alta, função da elevada área de superfície destes rejeitos. Neste contexto, as centrífugas vêm aparecendo como um equipamento alternativo cuja viabilidade merece ser estudada (VAN DEURSEN, 2016).

3.2.2 EQUIPAMENTOS DE SEPARAÇÃO SÓLIDO-LÍQUIDO

Várias tecnologias de desaguamento vêm sendo desenvolvidas com a finalidade de liberar a água aprisionada nos espaços porosos em rejeitos provenientes de processamento mineral. Operações de desaguamento via processos físicos ou mecânicos incluem uma grande variedade de equipamentos, usualmente centrífugas, filtros prensa, e espessadores. A sua escolha dependerá da resposta de algumas questões, como reportado por Silverblatt e Easton, 2002:

- Objetivos do processo de separação e qual o efeito da eficiência desse processo no fluxograma de beneficiamento;
- Tipo de operação, se contínua ou em batelada;

- Vazão de alimentação, concentração de sólidos, distribuição granulométrica e densidade dos sólidos e polpa de minérios;
- Necessidade de pré-tratamento da polpa, como coagulação/floculação, tipo de reagentes a serem utilizados (orgânicos ou inorgânicos) e características de resistência requeridas para os flocos;
- Quantidade de sólidos dispersos e umidade final requerida para a torta de filtração;
- Turbidez requerida e a quantidade de sólidos dissolvidos para a fase clarificada.

O desempenho dos equipamentos de separação sólido-líquido, mais do que na maioria dos equipamentos onde ocorre um processo físico, depende principalmente das etapas anteriores do processo. Uma mudança relativamente pequena no processo, pode influenciar a mudança da escolha ideal do equipamento. Sendo assim, a seleção da centrífuga para o desaguamento de rejeito de bauxita deve estar bem fundamentada considerando a qualidade do rejeito na alimentação e possíveis variações nas suas características, que devem ser previamente conhecidas (VAN DEURSEN, 2016).

Considerando a importância do desaguamento de rejeitos no cenário atual, há a necessidade de desenvolver uma compreensão conceitual das tecnologias disponíveis, otimizando os efeitos para acelerar o processo através da utilização desses equipamentos mecânicos que favorecem a separação sólido-líquido e permitem atingir uma umidade que possibilite a disposição do rejeito praticamente seco, colaborando ainda com o reaproveitamento da água e, assim, eliminando inconvenientes e riscos da disposição deste material em barragens.

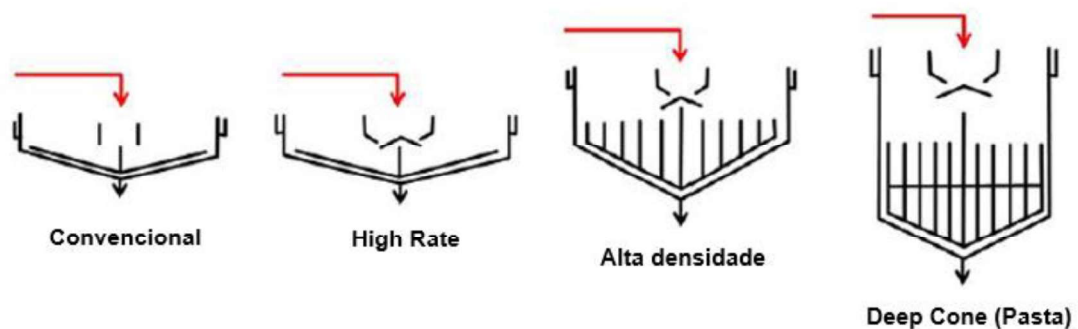
3.2.2.1 ESPESSADORES

O espessamento é uma operação de separação sólido-líquido que tem como finalidade separar sólidos suspensos em meio fluido pela ação da gravidade. É bastante empregado industrialmente em processos contínuos no adensamento de polpas e minérios, em unidades com reação de precipitação e no tratamento de

efluentes, dentre outros. Os equipamentos que realizam essa operação, chamados espessadores, são, em geral, tanques abertos de formato cilíndrico, instalados no eixo vertical com a entrada da suspensão na parte superior central, de fundo ligeiramente cônico para a retirada da polpa espessada e calha circulando o topo para descarga do líquido clarificado (PINTO, 2007).

Existem quatro tipos de espessadores que têm diferentes alturas do tanque: convencional, “*high rate*”, alta densidade e espessadores de pasta. “*High rate*” (ou alta capacidade) é o termo aplicado aos espessadores que processam um rendimento muito alto por otimização da floculação; e os espessadores de alta densidade e pasta são semelhantes aos espessadores convencionais, mas com menor diâmetro, ângulo do cone mais inclinado e tanques laterais mais altos. A diferença entre os tipos de espessadores pode ser observada na Figura 5.

Figura 5. Diferença entre os tipos de espessadores



Fonte: Adaptado de Wills, 2016

Os espessadores são geralmente construídos em aço ou concreto armado, podendo ser utilizada argila compactada para a construção do fundo. Para equipamentos de menores diâmetros é mais econômico a utilização de aço em sua construção (CHAVES, 2011).

3.2.2.2 FILTRO PRENSA

A filtração em filtro prensa ocorre quando o líquido filtrado é bombeado para dentro do filtro prensa e a pressão é aplicada gradualmente, favorecendo assim a separação entre o sólido e o líquido (GUIMARÃES, 2011).

Toda operação de filtração contempla a formação da torta, secagem e descarregamento. A depender do tipo de material que está sendo filtrado, pode ser conveniente incluir etapas de lavagem do meio filtrante ou da torta, ou ainda uma etapa de formação de uma camada de material mais grosseiro sobre o meio filtrante ("pre coat") (CHAVES, 2013).

A polpa é bombeada para dentro do filtro, com as placas travadas, utilizando uma bomba de deslocamento positivo capaz de pressurizar o sistema. A pressão obriga o filtrado a atravessar as telas e a escorrer pelos espaços existentes nas placas. Após o tempo de secagem, as placas são descarregadas individualmente. Finalmente as telas são lavadas, novamente uma a uma, juntadas e travadas e o filtro estará pronto para ser realimentado, repetindo o ciclo (OLIVEIRA et al, 2004). Na Figura 6, tem-se a representação de um filtro prensa da marca Andritz.

Figura 6. Representação de um filtro prensa

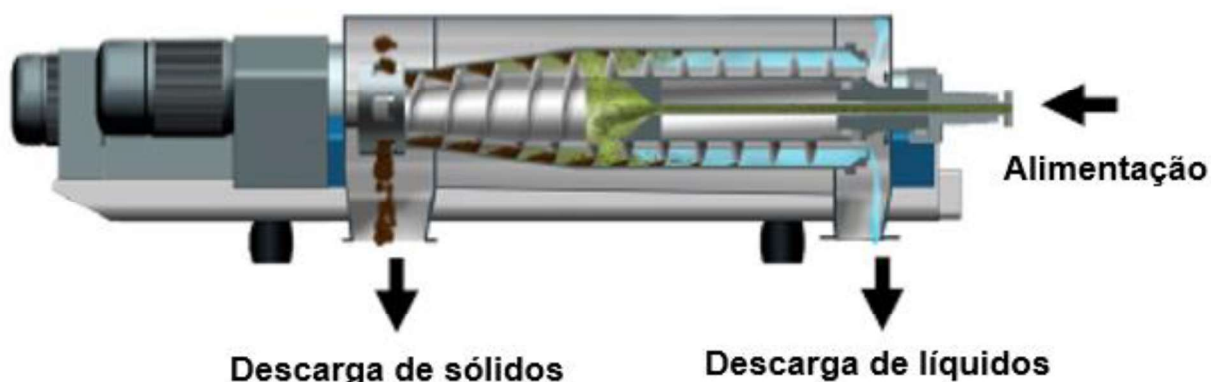


Fonte: <<https://www.andritz.com/separation-en/filter-presses-for-mining-pt>>. Acesso em 22/06/2022

3.2.2.3 CENTRÍFUGAS

A centrífuga é um equipamento de desaguamento que tem como característica principal o uso da força centrífuga, que atua sobre as partículas sólidas com uma intensidade muito maior que a força gravitacional e que pode ser multiplicada mediante o aumento da velocidade de rotação (CHAVES, 2013). Sua tecnologia de separação mecânica foi desenvolvida há aproximadamente um século, e permite o processamento contínuo da polpa, cuja alimentação se dá pelo eixo central, enquanto os produtos são descarregados por saídas no corpo do equipamento, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7. Corte esquemático de uma centrífuga decanter



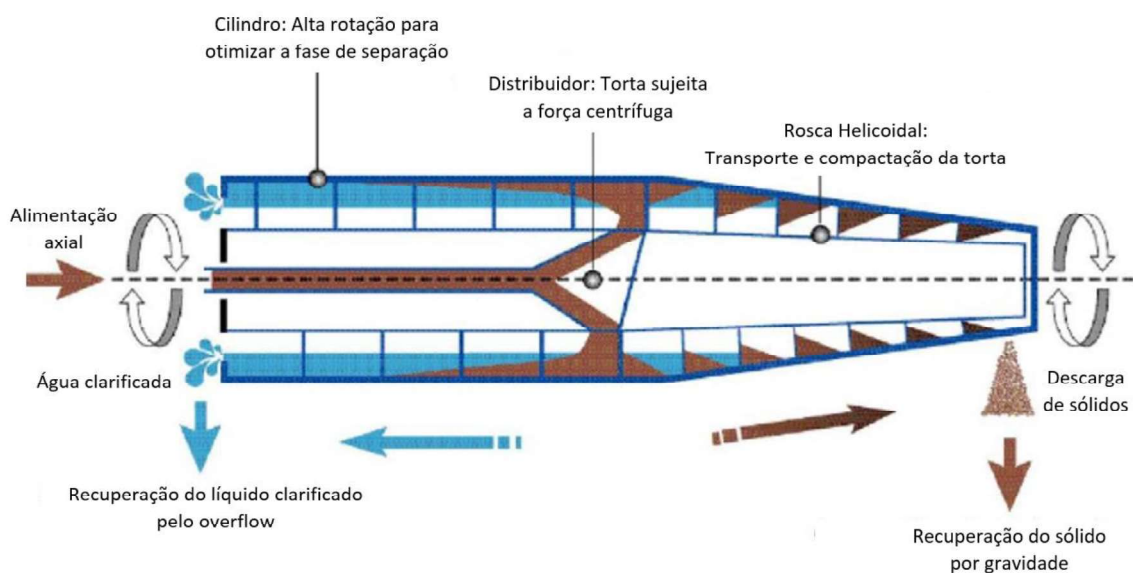
Fonte: Klug, Schwartz, 2019

O cilindro é afunilado em direção à descarga de sólidos da centrífuga de modo que, em um determinado ponto, os sólidos deixam a zona de líquido e passarão para a área seca. Assim, os sólidos desaguam por meio da força centrífuga até serem descarregados. Como o diâmetro da descarga do sólido é menor que o diâmetro da descarga do líquido, a fase líquida (clarificado) só pode sair do rotor pelo lado da descarga de líquido (KLUG, SCHWARZ, 2019).

Como ilustrado na Figura 8, o equipamento é composto por um eixo horizontal oco envolto por uma espiral e contido em uma câmara com seções cilíndrica e tronco-cônica. A alimentação se dá por um duto no eixo central que dá acesso à câmara de separação. A rotação do equipamento faz com que partículas sólidas sedimentem

contra a parede da seção cilíndrica da câmara. A sedimentação progressiva resulta em empilhamento de partículas, comprimindo-as e assim expulsando boa parte da água presente nos interstícios entre as partículas. A espiral solidária ao eixo central gira a uma velocidade diferente daquela do cilindro e este movimento arrasta o material depositado para a descarga de sólidos. Como a espiral é vazada em uma região próxima ao eixo central, a fase clarificada é conduzida para a outra extremidade do equipamento. A inclinação da porção cônica do cilindro faz com que a fase sólida seja descarregada em uma posição mais próxima ao eixo central e, portanto, fora do volume de influência da fase líquida (VAN DEURSEN, 2016).

Figura 8. Operação da centrífuga decanter



Fonte: Relatório interno CBA, 2019

Para os altos rendimentos normalmente esperados em aplicações de desaguamento, centrífugas decanter de operação contínua são uma opção razoável. Em geral, o aumento de escala de uma centrífuga decanter piloto para escala industrial é um grande desafio (MENESKLOU et al., 2021).

3.2.2.3.1. DIMENSIONAMENTO DE CENTRÍFUGAS

Segundo Schwarz, 2011, para o dimensionamento de uma centrífuga temos uma série de fatores que afetam a sua capacidade de separação. Estes são normalmente

determinados pelos parâmetros físicos, como o desenho geométrico e a rotação do equipamento. Os principais fatores a serem considerados são:

- Força centrífuga;
- Volume em suspensão;
- Tempo de retenção;
- Ângulo de praia / Ângulo do cone (ângulo da parte cônica do cilindro);
- Área de clarificação; e
- Área de clarificação equivalente.

Além disso, as principais características para comparação e dimensionamento de centrífugas são:

- D_b : diâmetro interno do cilindro externo em metros;
- D_w : diâmetro alagado em metros;
- L_{cyl} : comprimento do cilindro em metros;
- n : velocidade de rotação em rotações por minuto; e
- α : ângulo do cone em graus.

A força centrífuga é o parâmetro mais óbvio que vem à mente quando se considera a ação de uma centrífuga. A aceleração centrífuga máxima, desenvolvida dentro de uma centrífuga, é função de seu raio e velocidade de rotação angular. Mais comumente, o termo força G é usado no lugar de aceleração. A força G é definida como o múltiplo da constante gravitacional que é obtida na centrífuga, conforme Equação 1.

$$G = \frac{n^2 * D_b}{1800}$$

Equação 1. Cálculo da Força G

Onde,

G = força G;

n = velocidade de rotação do cilindro (rpm);

D_b = o diâmetro do cilindro (m).

Uma centrífuga de maior diâmetro funcionando com a mesma força G que uma menor proporcionará melhor separação. Isto significa que, ao comparar duas centrífugas de diâmetros diferentes, mas com velocidades de cilindro semelhantes, a unidade maior

gerará força G maior e pode-se esperar que forneça melhor separação sólido-líquido, resultando em maior eficiência de desaguamento.

Outra característica a ser considerada é o volume de suspensão de uma centrífuga, considerado como o conteúdo total da zona líquida no recipiente, e que pode variar em relação ao diâmetro do equipamento. O volume de suspensão (V_s) consiste na soma dos volumes das regiões cônica e cilíndrica, conforme Equações 2, 3 e 4.

$$V_{cyl} = \frac{\pi}{4} \times (D_b^2 - D_w^2) \times L_{cyl}$$

Equação 2. Cálculo do volume da região cilíndrica

$$V_{cm} = \frac{\pi}{8} \times \frac{(D_b - D_w)}{\tan \alpha} \times \left[\frac{D_b^2 + D_b D_w + D_w^2}{3} - D_w^2 \right]$$

Equação 3. Cálculo do volume da região cônica

$$V_s = V_{cyl} + V_{cm}$$

Equação 4. Cálculo do volume de suspensão

Onde,

D_b = o diâmetro do cilindro (m);

D_w = diâmetro alagado do cilindro (m);

L_{cyl} = comprimento do cilindro (m);

V_{cyl} = volume da região cilíndrica (m^3);

V_{cm} = volume da região cônica (m^3);

V_s = volume de suspensão (m^3);

α = ângulo do cone da centrífuga ($^\circ$).

O tempo de retenção pode ser avaliado como sendo o volume V_s dividido pela vazão alimentada à centrífuga. Quanto maior for o tempo de retenção, melhor será a eficiência de separação da centrífuga. Este deve ser avaliado individualmente para cada suspensão, e o ensaio que avalia o tempo de retenção é chamado de “*spin test*” e é feito usando-se pequenas quantidades de material em uma centrífuga de batelada em laboratório. Alguns parâmetros têm influência direta sobre este tempo: o tamanho

das partículas, a diferença de densidade entre as fases, a viscosidade da fase líquida e a proporção entre as fases (VAN DEURSEN, 2016).

Além disso, o tempo de retenção é uma informação fundamental para o adequado dimensionamento do equipamento. Outros fatores, como espessura do leito depositado na zona de compactação e ângulo de praia são relevantes, mas têm seu ajuste fino feito quando do início da operação em escala industrial. Uma vez obtido o tempo de retenção no ensaio piloto, calculado a partir da Equação 5, e a vazão de descarga de desaguado por metro de perímetro deve ser selecionado o equipamento industrial que atenda a operação desejada (VAN DEURSEN, 2016).

$$T_R = 3600 \times \frac{V_s}{Q}$$

Equação 5. Tempo de retenção em uma centrífuga

Onde,

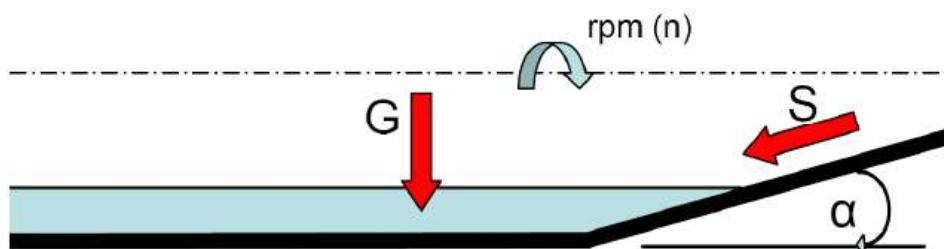
T_R = tempo de retenção medido (s);

V_s = volume de suspensão (m^3);

Q = vazão de alimentação à centrífuga (m^3/h).

Outro ponto de extrema importância é o ângulo do cone ou ângulo de praia, local por onde os sólidos são forçados pela hélice a subir pela seção cônica, conforme mostrado na Figura 9.

Figura 9. Força de deslizamento na praia de uma centrífuga decanter



Fonte: Schwarz, 2011

A força resultante da inclinação do cone e da rotação força estes sólidos de volta para o setor cilíndrico da centrífuga. Esta força S pode ser calculada como na Equação 6.

$$S = G \times \text{sen } \alpha$$

Equação 6. Força de escorregamento na seção cônica

Onde,

S = força de escorregamento da seção cônica;

G = força gravitacional gerada pela centrífuga;

α = ângulo do cone da centrífuga.

Esta força aumenta consideravelmente quando os sólidos saem da fase líquida e passam para a atmosfera, pois é proporcional à diferença de densidade entre o sólido e o meio onde este se encontra.

De acordo com Bai, Park e Wang, 2022, a área equivalente de clarificação de uma centrífuga é uma forma prática de se avaliar a eficiência deste equipamento comparada a outros tipos de centrífugas ou mesmo em relação a espessadores. Para sua avaliação utiliza-se a Equação 7.

$$\Sigma = \frac{(A_c G = \pi \times n^2 \times D_b^2 \times L_{cyl})}{1800}$$

Equação 7. Área equivalente de uma centrífuga

Onde Σ é a área da superfície equivalente de um espessador convencional sujeito à aceleração igual a uma vez o campo gravitacional terrestre.

3.2.2.4 OPERAÇÕES COM CENTRÍFUGAS DECANter

O desaguamento através de centrífugas do tipo decanter pode ser observado em diversas operações mineiras distribuídas no mundo, principalmente em zonas áridas, onde há necessidade de altas taxas de recirculação de água. Alguns exemplos com as principais características destas operações, todos retirados de Klug, 2019.

A mina de diamantes Braúna, da empresa Lipari, no Brasil tem uma centrífuga com diâmetro de 920 mm, processando 36,7 t/h base seca de polpa com percentual de sólidos de 45%. A concentração de sólidos obtida no rejeito desaguado é de 72%, sem adição de floculante. O equipamento opera com uma rotação de 930 rpm, resultando em uma aceleração centrífuga de 4.365 m/s² (445 x g). Na Figura 10, é apresentado o equipamento em operação.

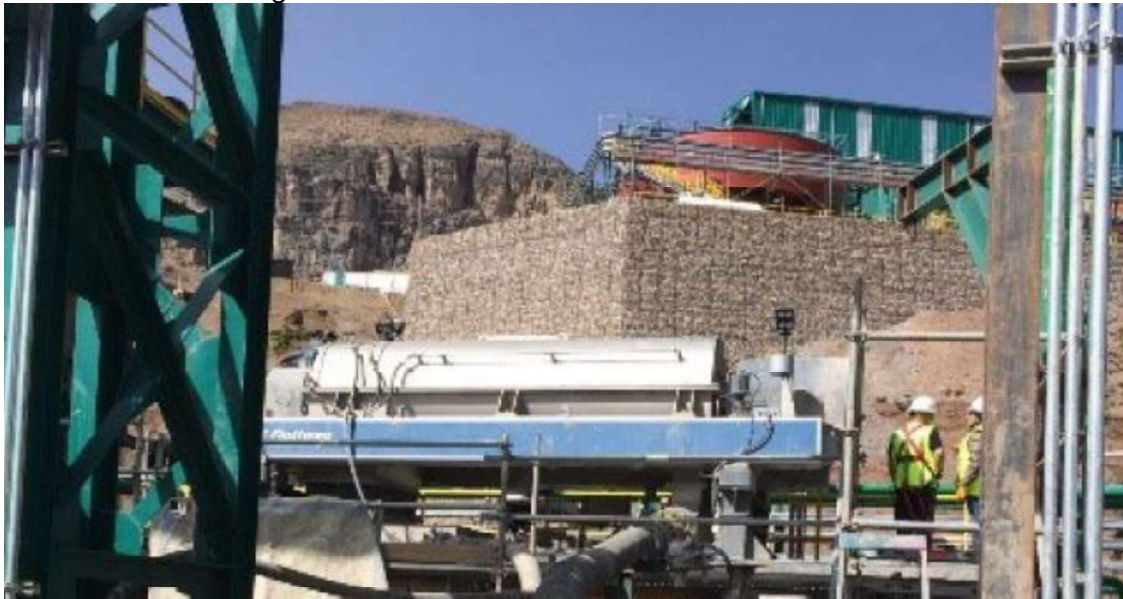
Figura 10. Lipari – Mina de Diamantes Braúna



Fonte: Klug, 2019

A mina de ouro e prata de Buenaventura Tambomayo, no Peru, tem uma centrífuga com diâmetro de 920 mm, processando 39,5 t/h base seca de polpa com percentual de sólidos de 45%. A concentração de sólidos obtida no rejeito desaguado é de 70%, sem adição de floculante. O equipamento opera com uma rotação de 925 rpm, resultando em uma aceleração centrífuga de 4.320 m/s² (440 x g). Foto da operação na Figura 11.

Figura 11. Buenaventura – Mina de Ouro e Prata



Fonte: Klug, 2019

Na mina de cobre de Cuajone, da Southern Copper, Peru, uma centrífuga com diâmetro de 920 mm processa 50,0 t/h base seca de polpa com percentual de sólidos de 53%. A concentração de sólidos obtida no rejeito desaguado é de 81%, com a adição de floculante. O equipamento opera com uma rotação de 1.000 rpm, resultando em uma aceleração centrífuga de 5.101 m/s^2 ($520 \times g$). A Figura 12 apresenta uma foto do equipamento.

Figura 12. Southern Copper – Mina de Cobre de Cuajone



Fonte: Klug, 2019

3.3 DISPOSIÇÃO DE REJEITOS

Durante a disposição dos rejeitos, deve ser levado em conta que o material possa ser manuseado e transportado por dutos para descarte com quantidades consideráveis de sólidos e em grandes quantidades, com o mínimo de energia requerida, ou então ter umidade suficiente baixa para ser transportado em caminhões ou transportadores de correia. Além disso, o material descarregado deve se espalhar pela área de descarte para acelerar a compactação e secagem. Como as suspensões concentradas geralmente desenvolvem comportamento de escoamento não newtoniano, um bom conhecimento das propriedades reológicas é importante para estabelecer a melhor condição de manuseio e transporte. O segundo fator importante é a capacidade de elevar física e economicamente a polpa de rejeitos a uma concentração suficientemente alta para que o esquema de disposição seja bem-sucedida (NGUYEN, BOGER, 1998).

Os métodos de disposição de rejeitos foram desenvolvidos devido a pressões ambientais, alterando as práticas da mineração. Métodos iniciais incluíam a descarga

de rejeitos em rios e córregos, posteriormente em barragens de rejeitos construídas para esse fim. Atualmente, devido a inúmeros fatores essa prática vem sendo alterada e novas tecnologias vem sendo desenvolvidas para a disposição desse material.

3.3.1 DISPOSIÇÃO A ÚMIDO

Como principal vantagem deste método pode-se citar o baixo custo de operação. Após a construção do depósito a polpa é bombeada ou direcionada via gravidade, passa por um processo de sedimentação e assim, se necessário, é feita a recuperação da água disponível. Neste caso, sempre há uma lâmina de água sobre o rejeito que impede um possível ressecamento por evaporação e o levantamento de poeiras (VAN DEURSEN, 2016). Ainda é a técnica mais comumente usada e requer grandes estruturas de terra (denominadas barragens) para sua disposição, podendo acarretar sérios impactos ao meio ambiente. Geralmente, são depósitos de grande volume, conforme exemplo observado na Figura 13, e geram elevados custos de gerenciamento e monitoramento.

Figura 13. Bauxita disposta a úmido após processo de beneficiamento em Mirai-MG



Fonte: Relatório interno CBA, 2019

As barragens de rejeito têm diferentes métodos de construção e podem ser nomeadas a jusante, montante ou linha de centro (LOZANO, 2006). Os detalhes, vantagens e desvantagens de cada método podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1. Detalhes sobre os métodos construtivos

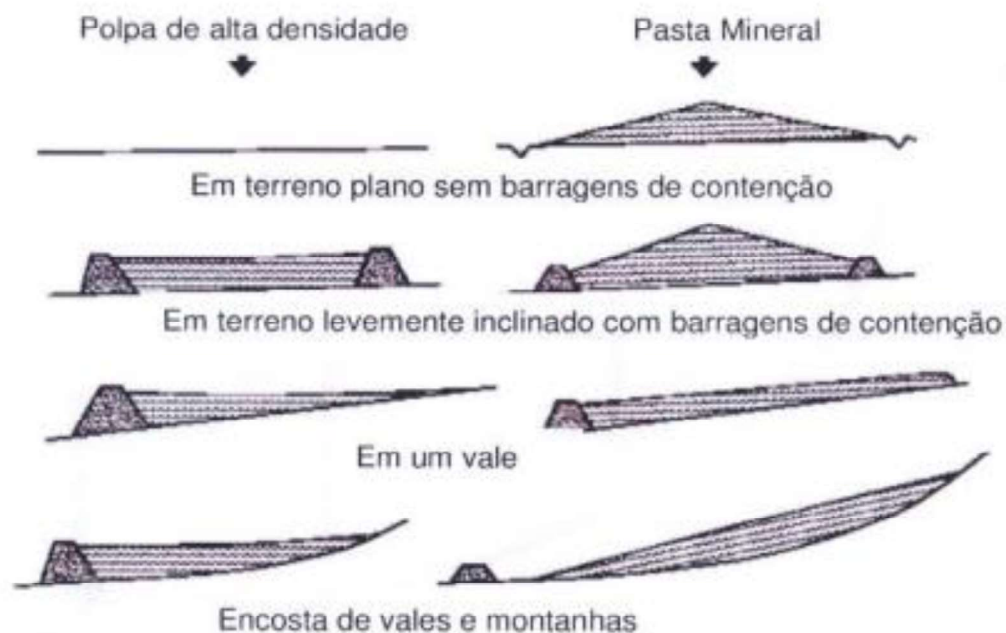
	Montante	Jusante	Linha de Centro
Método Construtivo	Método mais antigo e mais empregado Construção de dique inicial e os diques de alteamento periféricos com material de empréstimo, estêreis de lavra ou com <i>underflow</i> da ciclonagem Lançamento a partir da crista por ciclonagem ou spigots	Construção de dique inicial impermeável e barragem de pé Dreno interno e impermeabilização a montante	Variação do método a jusante
Vantagens	Menor custo Maior velocidade de alteamento Utilizado onde há limitação de área	Maior segurança Compactação de todo o corpo da barragem	Variação do volume de <i>underflow</i> necessário com relação ao método a jusante
Desvantagens	Baixa segurança devido a linha freática próxima ao talude de jusante, susceptibilidade de liquefação, possibilidade de <i>pipping</i>	Deslocamento do talude de jusante	Necessidade de sistemas de drenagem eficientes e sistemas de contenção a jusante

Fonte: Adaptado de Lozano 2006, apud Soares, 2004

3.3.2 DISPOSIÇÃO SEMI-ÚMIDA

A disposição realizada em polpas de alta densidade ou pasta semiúmida pode ser feita de diferentes formas, e suas alternativas são melhor apresentadas na Figura 14. O rejeito lançado por este método pode ou não ser previamente espessado por meio de equipamentos de separação sólido-líquido, e sua disposição final pode ser através de um único ponto, que deve ter sua posição alterada regularmente em função da geometria do sistema de disposição, o que permite uma melhor ocupação do reservatório, ou através de diversos pontos utilizando calhas, “canhões”, “espigotes” ou torres de distribuição formando diferentes arranjos e combinações (CARVALHO, 2017).

Figura 14. Alternativas para disposição de rejeito em pasta semiúmida



Fonte: Tessarotto, 2015

3.3.3 DISPOSIÇÃO A SECO

Em paralelo ao desenvolvimento tecnológico dos equipamentos de filtração, principalmente filtros prensa automatizados e de altíssima capacidade, e/ou pela impossibilidade técnica de disposição de pasta, e pelos altos custos das barragens convencionais, a filtração dos rejeitos, principalmente das lamas, se mostrou técnica e comercialmente viável, se tornando o método de disposição mais eficiente na ocupação do espaço disponível com a formação de pilhas. Rejeitos de flotação de minério de ferro podem, em geral, ser facilmente desaguados em filtros de discos ou filtros horizontais a vácuo para serem empilhados a seco (TESSAROTTO, 2015). Na Figura 15, tem-se um exemplo de empilhamento de rejeito através do uso de filtro prensa.

Figura 15. Empilhamento de rejeito a seco



Fonte: <<https://institutominere.com.br/blog/empilhamento-de-rejeito-a-seco-alternativa-a-disposicao-em-barragens>>. Acesso em 22/06/2022

4 MATERIAIS E MÉTODOS

A avaliação e análise crítica do comportamento do rejeito do beneficiamento da bauxita proveniente da Zona da Mata mineira foi feita após processamento do material em planta piloto contendo as etapas de cominuição, desagregação e peneiramento do material. Após a etapa de peneiramento, o *undersize* foi utilizado como alimentação da centrífuga, sendo três diferentes centrífugas decanter avaliadas durante o período dos ensaios, e considerando as características e parâmetros operacionais de cada equipamento.

Previamente aos ensaios piloto, foram realizados a caracterização do rejeito da planta piloto de beneficiamento e ensaios em escala de laboratório para melhor conhecimento de suas características.

O desenvolvimento do método utilizado no presente trabalho englobou os seguintes componentes principais:

- Amostragem do circuito;
- Ensaio em laboratório;
- Avaliação de resultados;
- Ensaio em escala piloto de centrifugação;
- Avaliação e análise estatística dos resultados.

4.1 PROCEDIMENTOS ANTERIORES À AMOSTRAGEM

Os trabalhos preliminares incluíram uma inspeção prévia, bem como levantamento de informações detalhadas sobre a operação da planta piloto de lavagem.

A seguir estão listados os procedimentos adotados anteriores à amostragem:

- Inspeção dos pontos de amostragem, determinando os acessos, procedimentos de segurança a serem tomados e método para transporte das amostras;
- Seleção de dispositivos suficientes para o número de pontos de amostragem, considerando geometria e volumes;
- Preparo e seleção de recursos necessários para tomada das amostras;
- Identificação de cada recipiente de armazenamento de amostras com etiquetas internas e externas.

4.2 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

A caracterização dos sólidos é essencial para entender o comportamento do rejeito de bauxita na etapa de desaguamento. Foi realizada a análise granulométrica do rejeito desaguado, utilizando peneiramento a úmido e difração a laser, determinação do peso específico do sólido (medido por picnometria) e análise química, utilizando fluorescência de raios X.

O peneiramento a úmido gera um resultado mais fiel da distribuição granulométrica da amostra, especialmente para as frações mais finas, como era o caso deste material. O mesmo é realizado de maneira similar ao peneiramento a seco, com peneiramento realizado em peneirador suspenso com alimentação constante de

vazão baixa de água por aproximadamente 20 minutos. Para a fração mais fina, o material foi submetido a análise por difração a laser (FELIPE, 2019).

Ensaio para determinação da massa específica dos sólidos foram conduzidos em picnômetro de vidro com volume de 50 mL. Foram feitos 2 ensaios para o cálculo da massa específica média, utilizando água como líquido.

4.3 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Os ensaios de centrifugação de bancada (“*spin test*”) são fundamentais para avaliação do desempenho do material no equipamento a ser estudado. Apresentam grande fator de segurança, e permitem o dimensionamento do equipamento para a fase seguinte e avaliação da obrigatoriedade ou não do uso de algum polímero para melhores resultados na fase líquida.

A amostra de polpa é colocada em tubos transparentes e graduados, que são colocados em um suporte que sofrerá rotação com velocidade e tempos controlados, simulando o efeito de uma centrífuga. Os ensaios foram realizados em centrífuga de laboratório, conforme Figura 16, com temporizador, ângulo variável e rotação máxima de 4.500 rpm, com e sem a utilização de floculante.

Figura 16. Centrífuga de laboratório



Fonte: Relatório Interno CBA, 2019

O polímero usado para floculação pode ser aniônico ou catiônico para neutralizar as cargas superficiais dessas partículas finas para formar sólidos floculados maiores (LEUNG, 2020). Com o objetivo de avaliar a eficiência dos polímeros no processo de desaguamento, foram previamente testados polímeros catiônicos e aniônicos em diferentes dosagens, concentração de floculante 0,1% t e pH em torno de 5,5. Os melhores resultados foram do polímero aniônico, dosagem na faixa de 80 ppm. O polímero utilizado foi o SUPERFLOC A-130 HMW, marca Kemira.

4.4 ENSAIOS PILOTO

4.4.1 PLANTA PILOTO DE BENEFICIAMENTO DE BAUXITA

As plantas piloto são operadas para gerar informação sobre o comportamento do sistema para uso no projeto de instalações maiores. O objetivo ao projetar, construir e operar uma planta piloto é obter informações sobre um determinado processo em regime contínuo de operação, além da possibilidade de conduzir estudos de variabilidade. Com base nos dados obtidos, pôde ser determinado se o processo é técnica e economicamente viável, assim como estabelecer os parâmetros de operação ótimos de tal processo (*“scale up”*), para o posterior projeto e construção da planta em escala industrial.

Também são usadas para reduzir o risco associado com a construção de grandes plantas de processo quando não se têm informações suficientes, a respeito dos parâmetros e eficiência de operação para o seu dimensionamento, além de permitir estudos de variabilidade.

Para o trabalho proposto, o ROM foi processado em planta piloto (Figura 17) com as operações unitárias comuns a uma etapa de beneficiamento de bauxita, sem o processamento em um circuito de finos. A planta piloto tem capacidade de processamento médio de 30 t/h de ROM, valor que varia conforme a característica do material alimentado, e apresenta recuperação mássica em torno de 50%, composta pelos seguintes equipamentos principais:

- Um britador tipo *sizer*, com abertura de 50 mm;

- Um chute desagregador que utiliza a tecnologia de jatos de alta pressão para promover a desagregação entre as partículas de argila e as partículas de bauxita, tecnologia similar ao *Hydro-clean*;
- Uma peneira com abertura de 1 mm;
- Centrífuga decanter.

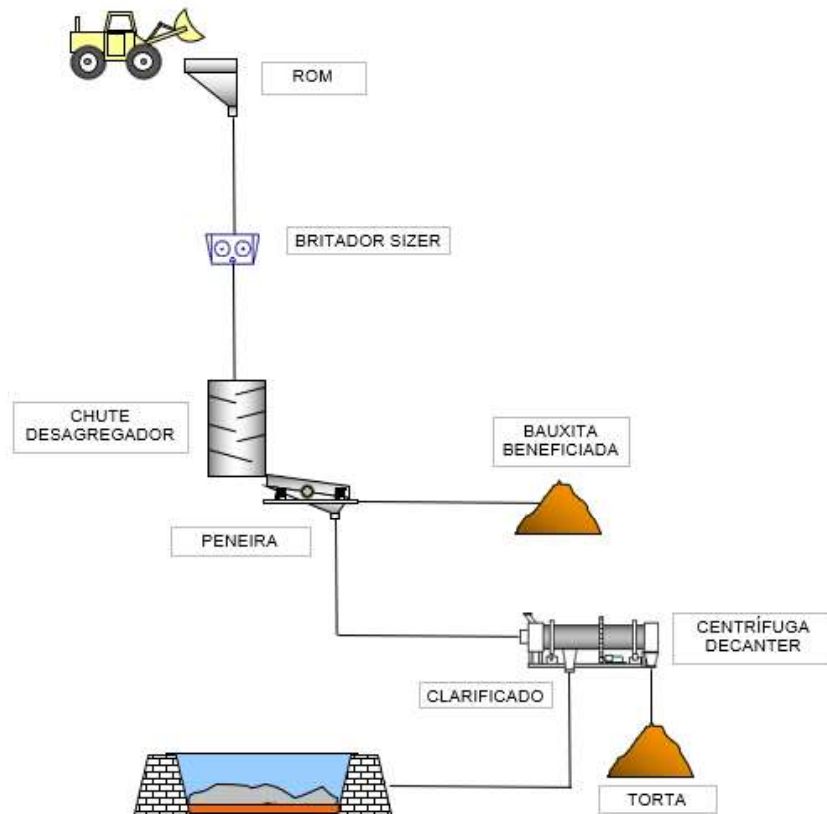
Figura 17. Planta piloto de beneficiamento de bauxita



Fonte: Autoria Própria

O fluxograma de processos da planta piloto, com o indicativo de todos os equipamentos, pode ser visualizado na Figura 18.

Figura 18. Fluxograma de processos da Planta Piloto



Fonte: Autoria Própria, 2023

As principais variáveis de controle do processo são a vazão de alimentação da planta, granulometria do produto, eficiência de lavagem do produto, granulometria da alimentação da centrífuga, percentual de sólidos da alimentação da centrífuga, percentual de sólidos da fase sólida (torta) da centrífuga e percentual de sólidos da fase líquida (clarificado) da centrífuga.

4.4.2 CENTRÍFUGAS DECANTER PILOTO

Para fins de aumento de escala, os testes foram realizados em planta piloto. Diferente dos testes de bancada, os testes em plantas piloto trabalham em regime contínuo (“*steady state*”) que representa melhor a operação futura da planta. Ensaios experimentais foram realizados com rejeitos da planta de beneficiamento de bauxita em três centrífugas decanter de diferentes fornecedores e tamanhos.

A avaliação do desempenho da centrífuga teve como base os valores dos dados coletados durante o período de teste com cada um dos equipamentos, que englobou

pouco mais de um mês para cada um das centrífugas decanter avaliadas. Foram tomadas amostras diariamente para composição do resultado final em cada um dos dias. Para cada um dos equipamentos, foram considerados um total de 20 dias úteis de operação para a consolidação dos resultados.

A qualidade da separação das fases sólido-líquido depende do design da centrífuga decanter e de diferentes variáveis operacionais, incluindo a força centrífuga, a velocidade do diferencial e a vazão de alimentação (SCHUBERT et al., 2021). As informações sobre a geometria dos equipamentos são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2. Características geométricas dos equipamentos testados em escala piloto

Centrífuga	Diâmetro do cilindro (mm)	Comprimento do cilindro (mm)
1	620	2.800
2	457	1.372
3	353	1.445

Para a medida da concentração de sólidos foi utilizada a balança Marcy, conforme apresentado na Figura 19, que é um equipamento prático e muito utilizado nas operações de usinas de beneficiamento de minérios, sendo utilizada para medição da densidade de polpa, de sólidos e de líquidos, com leituras rápidas, sem a necessidade de utilização de gráficos, ábacos ou a realização de cálculos matemáticos (SAMPAIO, 2007).

Figura 19. Balança Marcy com recipiente utilizados na determinação de densidade de polpas e porcentagem de sólidos



Fonte: Autoria Própria, 2023

Nas operações contínuas em escala piloto e industrial é comum medir o fluxo de polpa em m^3/h , a densidade de polpa (D_p) em kg/m^3 e a densidade dos sólidos (D_s) em kg/m^3 . Segundo Wills (1988) apud Sampaio, 2007, o fluxo de sólidos secos ou massa de sólidos, em kg/h , pode ser calculado por meio da expressão da Equação 8.

$$\text{Concentração de sólidos (\%)} = \frac{[D_s \times (D_p - 1)]}{[(D_s - 1) \times D_p]}$$

Equação 8. Determinação da concentração de sólidos

Onde,

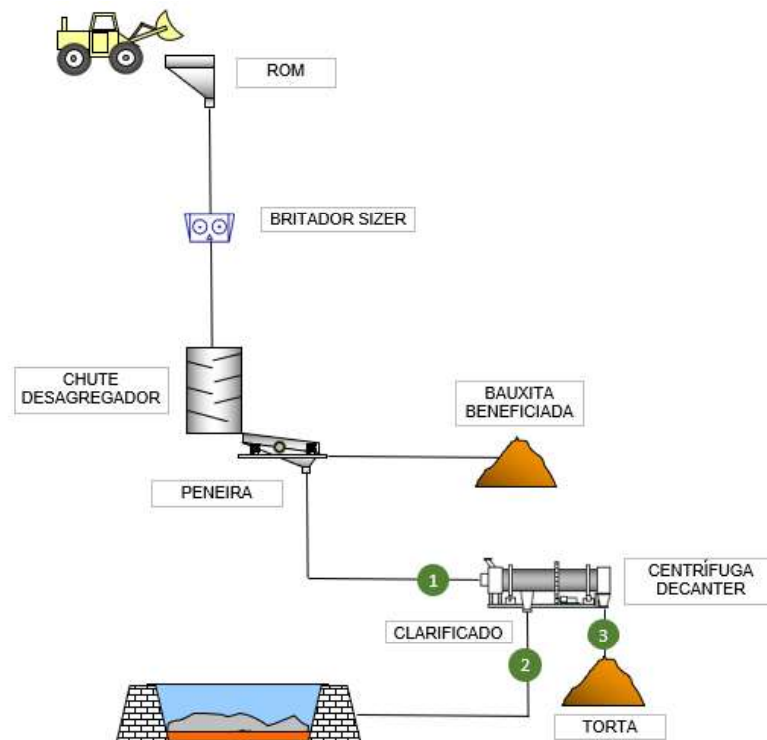
D_s = Densidade do sólido;

D_p = Densidade do líquido.

A tomada de amostras durante os testes foi realizada após a operação da planta piloto estar estável. Com o circuito estável, foram tomadas as amostras da alimentação da centrífuga, clarificado da centrífuga e torta da centrífuga. Para a densidade real do sólido foi considerado o valor de $2,5 \text{ g/cm}^3$, e para a densidade do líquido o valor foi de $1,0 \text{ g/cm}^3$. Os valores utilizados estão apontados no Apêndice I.

Os pontos de amostragem apresentados referentes à alimentação, à torta e ao clarificado da centrífuga, objetos de estudo neste trabalho, podem ser observados na Figura 20.

Figura 20. Fluxograma de processos da Planta Piloto com indicativo dos pontos de amostragem



Fonte: Autoria Própria, 2023

As condições de alimentação das centrífugas foram similares, e algumas características do equipamento como força G aplicada, velocidade de rotação do cilindro, e velocidade diferencial do helicoidal foram tomadas para consolidação dos resultados.

A recuperação é dada pela relação entre a massa de sólidos na alimentação, e a massa de sólidos que foi direcionada para a fração sólida (torta). Para o cálculo de recuperação de sólidos foi utilizada a fórmula da Equação 9.

$$Re = \frac{\%ST}{\%SA} \times \frac{\%SA - \%SC}{\%ST - \%SC}$$

Equação 9. Recuperação de sólidos

Onde,

%SA = % sólidos na alimentação;

%ST = % de sólidos na torta;

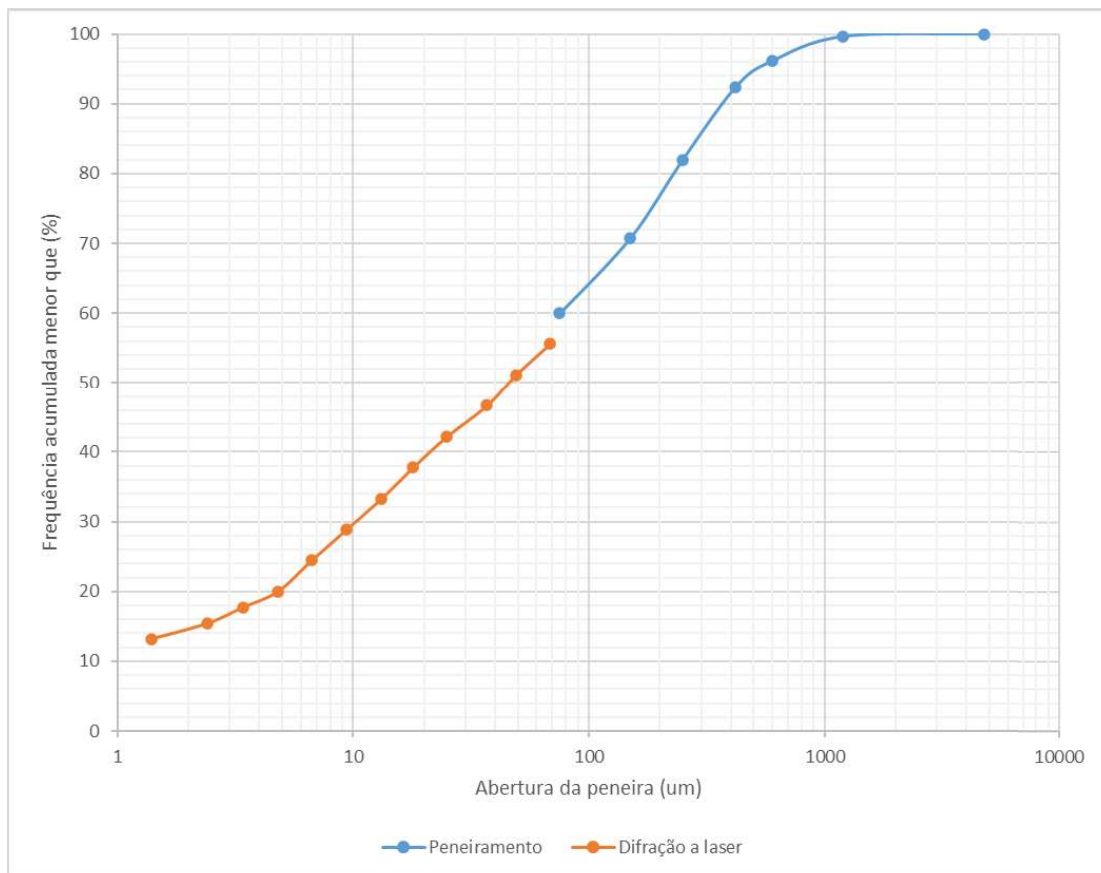
%SC = % de sólidos no clarificado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA

A distribuição granulométrica do rejeito pode ser observada na Figura 21, resultando em um d_{50} de 45 μm e d_{95} de 547 μm , e 10% do material abaixo de 1 μm , granulometria que pode interferir no processo de desaguamento.

Figura 21. Distribuição granulométrica do rejeito desaguado da Zona da Mata



Fonte: Autoria Própria, 2022

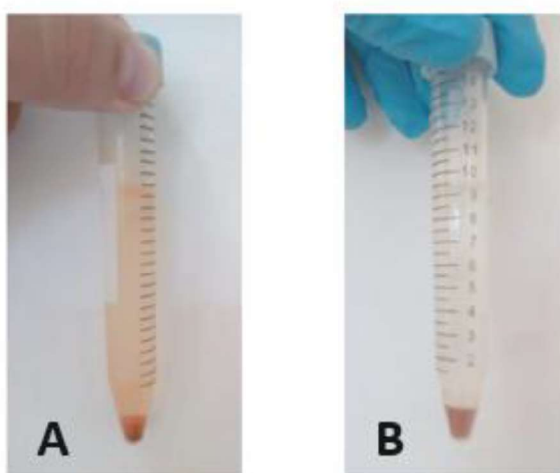
A natureza do rejeito é importante quando o desaguamento é considerado como uma das etapas do processo. A análise química do material foi feita por fluorescência de raios-X e mostra que este contém 31,7% de Al_2O_3 , 22,1% de SiO_2 e 23,4% de Fe_2O_3 . Os demais, como TiO_2 , se encontram em menores proporções.

Foram realizados ensaios de picnometria para determinação da massa específica da amostra do rejeito obtido durante a campanha de amostragem. O primeiro ensaio resultou em $2,841 \text{ g/cm}^3$ e o segundo ensaio em $2,844 \text{ g/cm}^3$. Dessa forma, a massa específica do sólido obtida através de picnometria foi considerada de $2,842 \text{ g/cm}^3$.

5.2 ENSAIOS DE LABORATÓRIO

Para realização do ensaio foi feita a tomada de amostra do rejeito da bauxita proveniente da planta piloto, em etapa anterior ao processo de desaguamento. Após etapa de homogeneização, uma parcela foi transferida para béquer, e após agitação vigorosa foram distribuídos em tubos Falcon para o teste de centrifugação. Os ensaios foram realizados sem e com a adição de floculante, conforme Figura 22.

Figura 22. Amostra centrifugada após 30 segundos, sem floculante (A) e com floculante (B)



Fonte: Relatório interno CBA, 2019

De acordo com Jackson, 1980, a aplicação de centrífugas decanter em processos de separação sólido/líquido frequentemente envolve a introdução de reagentes de floculação ou coagulação para auxiliar na sedimentação do material suspenso.

Quando a solução polimérica é aplicada, há excelente clarificação e captura de sólidos do processo de centrifugação, tornando-o ainda melhor.

Após os ensaios pode-se perceber uma alta taxa de sedimentação na amostra, e mesmo a fase clarificada sem a adição de flocculantes tem aparência clara e apresenta uma baixa fração de sólidos em suspensão. Em uma operação em escala industrial, essa fração pode ter uma maior turbidez e o uso de flocculantes pode ser aplicado para correção deste ponto. Com os resultados de laboratório, foi avaliado o comportamento do rejeito da bauxita na centrífuga decanter sem a adição de nenhum tipo de produto.

5.3 ENSAIOS PILOTO

Com o início dos ensaios, todos os parâmetros do processo da planta piloto definidos e, em seguida, os parâmetros da centrífuga ajustados conforme características e geometria de cada equipamento analisado. Foram determinadas a concentração de sólidos da alimentação, da fase sólida e da fase líquida, chamadas neste trabalho de torta e clarificado.

Os parâmetros de processo, como força centrífuga, velocidade do diferencial, velocidade do cilindro, e valores médios de vazão são mostrados na Tabela 3. Vale destacar que a taxa de alimentação da Centrífuga 1 foi maior devido às características geométricas do equipamento.

Tabela 3. Variáveis operacionais durante os ensaios

Centrifuga	Força G	Velocidade do diferencial (rpm)	Velocidade do cilindro (rpm)	Vazão de alimentação média (m ³ /h)
1	1.500	12 a 23	1.400	50
2	2.000	10	2.800	7
3	2.700	17	3.700	6,6

A concentração de sólidos das amostras foi determinada pela densidade das mesmas. Para isso, amostras de clarificado e torta foram retiradas diretamente da saída do clarificado e da pilha de torta, para realização das medições. O valor medido para a

concentração mássica de sólidos representa o valor dos fluxos após 1 dia de operação. Foram realizadas várias medições durante um dia de operação para composição da amostra final, durante intervalos fixos de tempo e após a estabilidade do circuito.

5.3.1 ENSAIOS PILOTO COM O EQUIPAMENTO 1

Para a avaliação técnica do equipamento foi analisada a aderência entre os dados coletados durante o período de operação.

As características principais do equipamento em questão são diâmetro do cilindro de 620 mm e 2.800 mm de comprimento (relação L/D de 1:4,5).

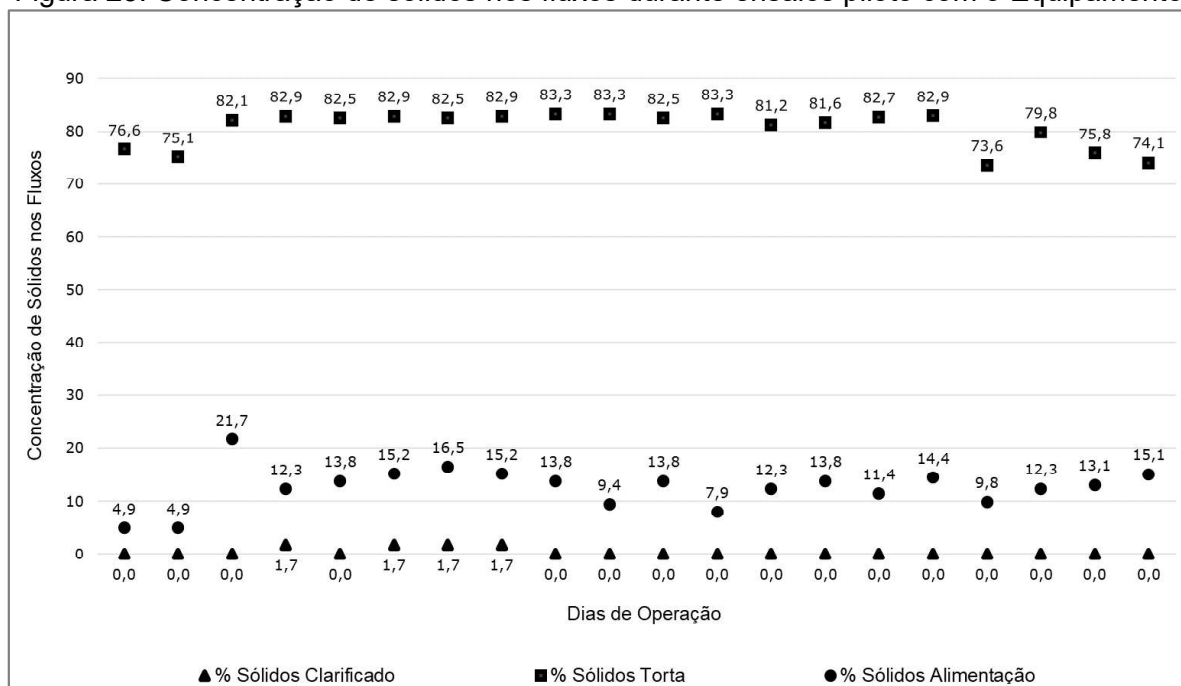
Tabela 4. Valores de concentração de sólidos para o Equipamento 1

Amostra	Alimentação (%)	Torta (%)	Clarificado (%)
1	4,9	76,6	0
2	4,9	75,1	0
3	21,7	82,1	0
4	12,3	82,9	1,7
5	13,8	82,5	0
6	15,2	82,9	1,7
7	16,5	82,5	1,7
8	15,2	82,9	1,7
9	13,8	83,3	0
10	9,4	83,3	0
11	13,5	82,5	0
12	7,9	83,3	0
13	12,3	81,2	0
14	13,8	81,6	0
15	11,4	82,7	0
16	14,4	82,9	0
17	9,8	73,6	0
18	12,3	79,8	0
19	13,1	75,8	0
20	15,1	74,1	0
Média	12,5	81,7	0,5
Desvio	3,79	3,35	0,68
Variância	15,11	11,78	0,48

Com o Equipamento 1, tem-se o valor de concentração de sólidos na alimentação médio de 12,5%, com um pico de 21,7% no terceiro dia de operação, e o menor valor em 4,9%. Para esse mesmo fluxo foi observado um desvio de 3,79, e uma variância de 15,11. Para a torta, foi encontrado um valor médio de concentração de sólidos de 81,7%, e para a fase clarificada de 0,5%. Os dias em que a concentração de sólidos na alimentação ficou na faixa de 4,9% e em 21,7% são referentes ao início da operação, e podem se justificar devido à falta de estabilidade do circuito durante as coletas de amostra ainda no início dos ensaios. Com o decorrer da operação, foram observadas taxas de alimentação mais constantes.

No gráfico da Figura 23 pode-se avaliar o comportamento dos fluxos em cada dia de ensaio.

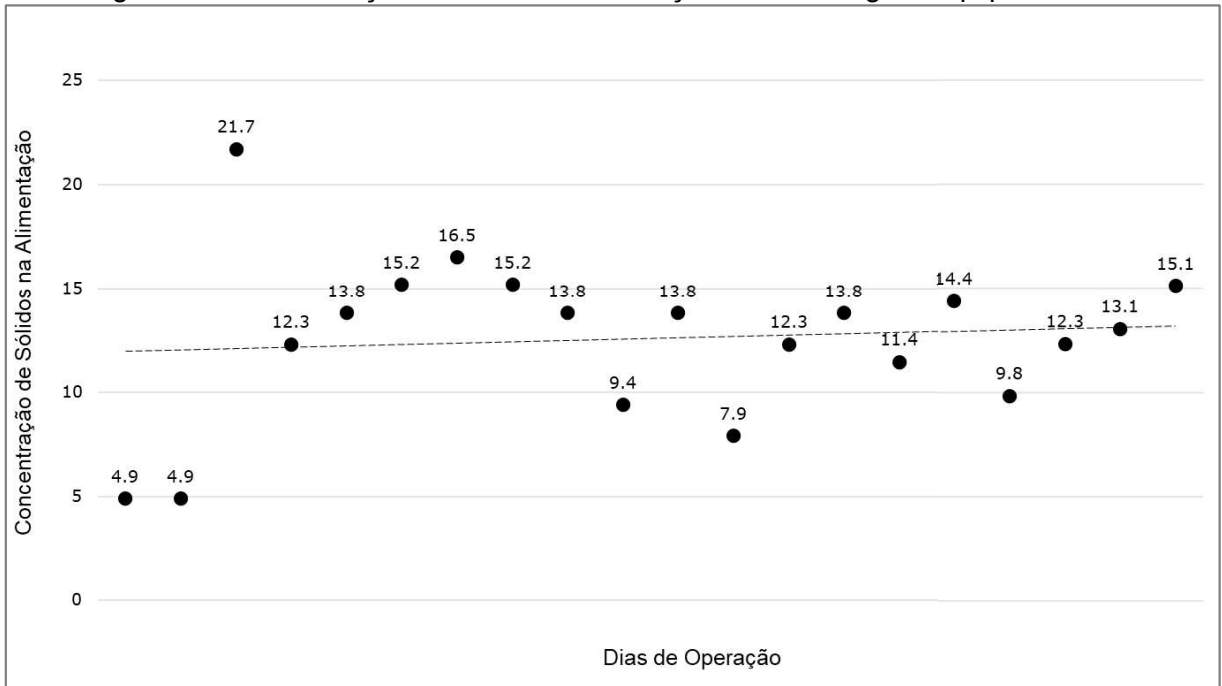
Figura 23. Concentração de sólidos nos fluxos durante ensaios piloto com o Equipamento 1



Fonte: Autoria própria, 2023

Avaliando cada um dos fluxos separadamente, percebe-se que os valores de concentração de sólidos na alimentação começam a ficar mais constantes a partir do terceiro dia de operação (Figura 24). Como os ensaios foram feitos com uma planta piloto, o aprendizado no decorrer do tempo é fundamental para melhores resultados.

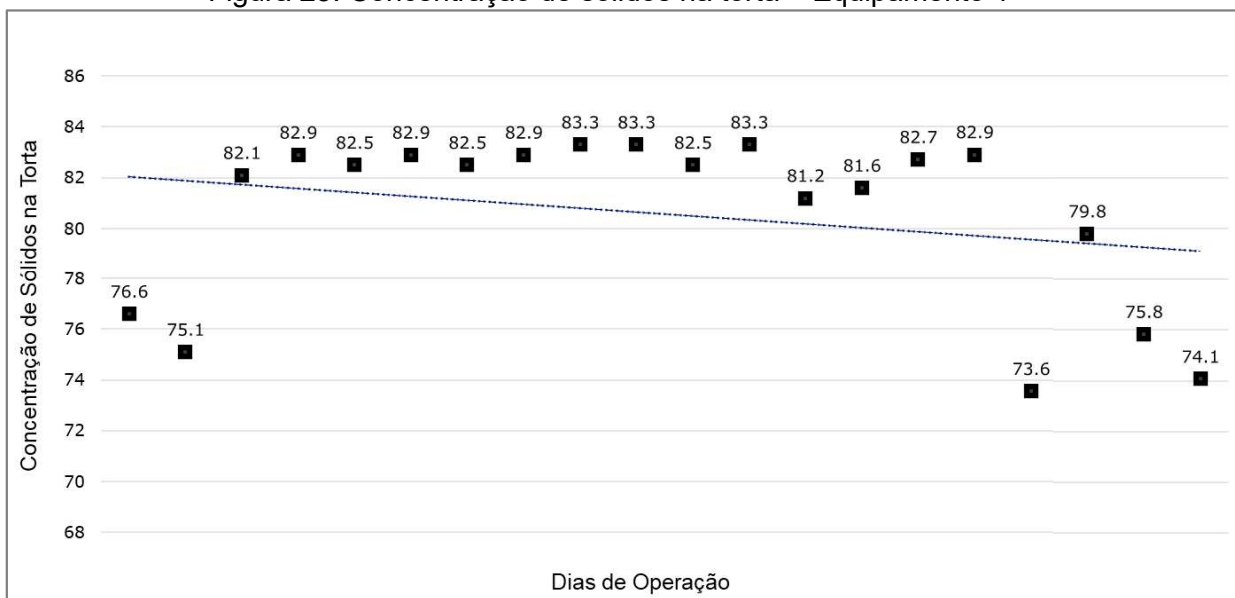
Figura 24. Concentração sólidos na alimentação da centrífuga – Equipamento 1



Fonte: Autoria própria, 2023

Avaliando a concentração de sólidos na fase sólida (torta) no gráfico da Figura 25 percebe-se a mesma tendência para os primeiros dias de operação, com valores mais baixos que a média geral. Também foram obtidos resultados abaixo da média nos últimos dias de ensaio. Como os parâmetros e o material utilizado durante os ensaios se mantiveram constantes, tal fato pode ser justificado pela heterogeneidade da bauxita avaliada.

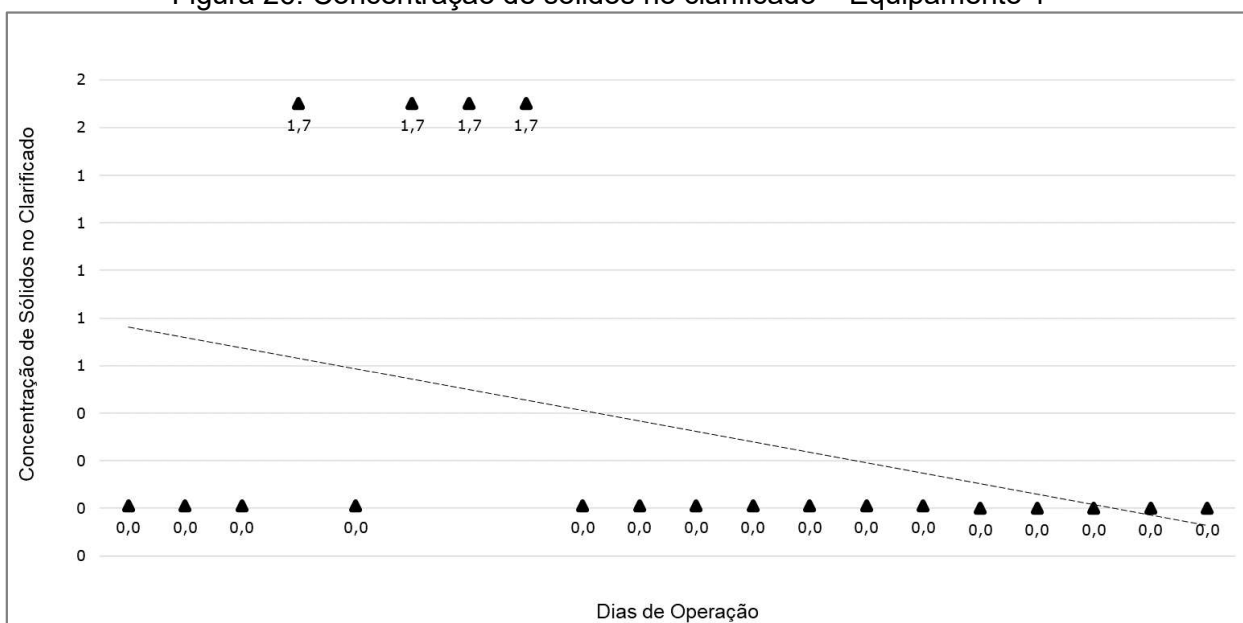
Figura 25. Concentração de sólidos na torta – Equipamento 1



Fonte: Autoria própria, 2023

Tal comportamento não é observado nos resultados de concentração de sólidos do clarificado, conforme observado na Figura 26. Tais valores são menores, e possuem menor desvio em seus resultados, chegando a apontar 0% na maioria dos ensaios, o que reflete uma excelente recuperação de sólidos.

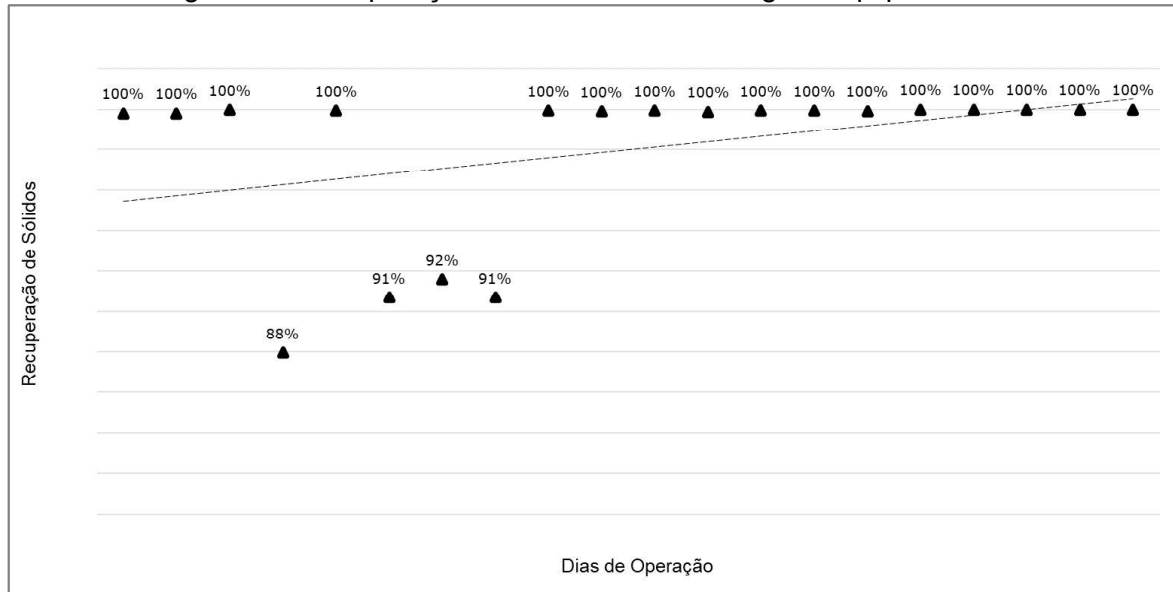
Figura 26. Concentração de sólidos no clarificado – Equipamento 1



Fonte: Autoria própria, 2023

Como os valores de concentração de sólidos no clarificado, na maior parte dos dias, foram 0%, os resultados de recuperação de sólidos no Equipamento 1 ficam em 100% na maioria dos dias, com alguns valores próximos de 90% apenas durante os dias em que foram registrados sólidos nesse fluxo, conforme pode ser observado no gráfico da Figura 27.

Figura 27. Recuperação de sólidos na centrífuga – Equipamento 1



Fonte: Autoria própria, 2023

Com todos os resultados apresentados, a concentração de sólidos desaguada (torta) tem a aparência da Figura 28, foto retirada da pilha de torta formada após a realização dos ensaios com o Equipamento 1.

Figura 28. Fração de sólidos desaguada após ensaios com o Equipamento 1



Fonte: Autor, 2021

5.3.2 ENSAIOS PILOTO COM O EQUIPAMENTO 2

O segundo ensaio foi realizado com equipamento de diâmetro de cilindro de 457 mm e 1372 mm de comprimento (relação L/D de 1:3). Devido às diferenças de características mecânicas dos equipamentos testados, para a comparação dos ensaios foram avaliadas apenas as saídas de cada fluxo, a fim de entender o comportamento do material desaguado considerando os diferentes cenários.

Na Tabela 5 podem ser observados os resultados durante os dias de operação.

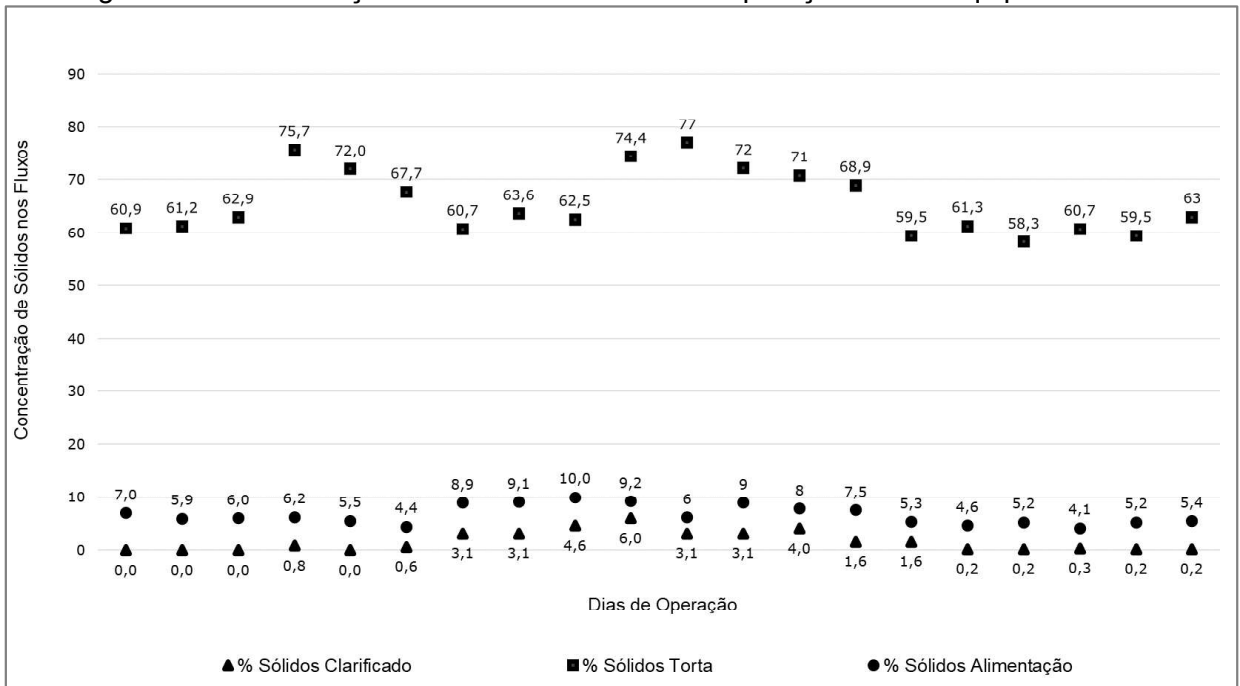
Tabela 5. Valores de concentração de sólidos para o Equipamento 2

Amostra	Alimentação (%)	Torta (%)	Clarificado (%)
1	7,0	60,9	0
2	5,9	61,2	0
3	6	62,9	0
4	6,2	75,7	0,8
5	5,5	72	0
6	4,4	67,7	0,6
7	8,9	60,7	3,1
8	9,1	63,6	3,1
9	10	62,5	4,6
10	9,2	74,4	6
11	6	77	3,1
12	9	72	3,1
13	8	71	4
14	7,5	68,9	1,6
15	5,3	59,5	1,6
16	4,6	61,3	0,2
17	5,2	58,3	0,2
18	4,1	60,7	0,3
19	5,2	59,5	0,2
20	5,4	63	0,2
Média	6,6	65,6	1,6
Desvio	1,76	5,91	1,8
Variância	3,27	36,82	3,39

Com o Equipamento 2 foi obtido um valor de alimentação médio de concentração de sólidos em 6,6%, o que pode ser justificado devido ao equipamento ter uma capacidade menor do que o Equipamento 1. Foram verificados valores de desvio de 1,76 e variância de 3,27. O valor médio de concentração de sólidos na torta foi de 65,6%, e no clarificado de 1,6%. O maior valor de concentração de sólidos na alimentação foi de 10 % e o menor valor de 4,1%. Com o decorrer da operação, observam-se taxas de concentração de sólidos na alimentação mais constantes.

Os valores de concentração de sólidos amostrados no segundo ensaio são apresentados na Figura 29. Pode ser observado que para o Equipamento 2 a variação dos fluxos foi maior.

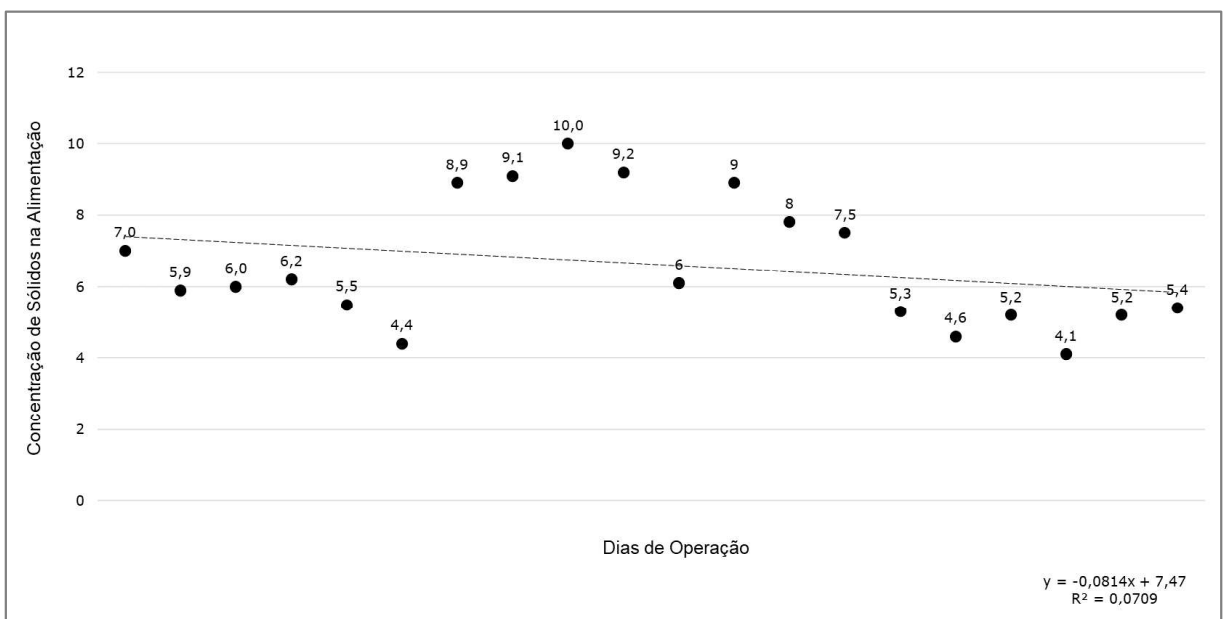
Figura 29. Concentração de sólidos nos fluxos de operação com o Equipamento 2



Fonte: Autoria própria, 2023

Com a avaliação de cada um dos fluxos para o Equipamento 2 (Figura 30) foram observados menores valores de concentração de sólidos na operação no início e ao fim dos testes.

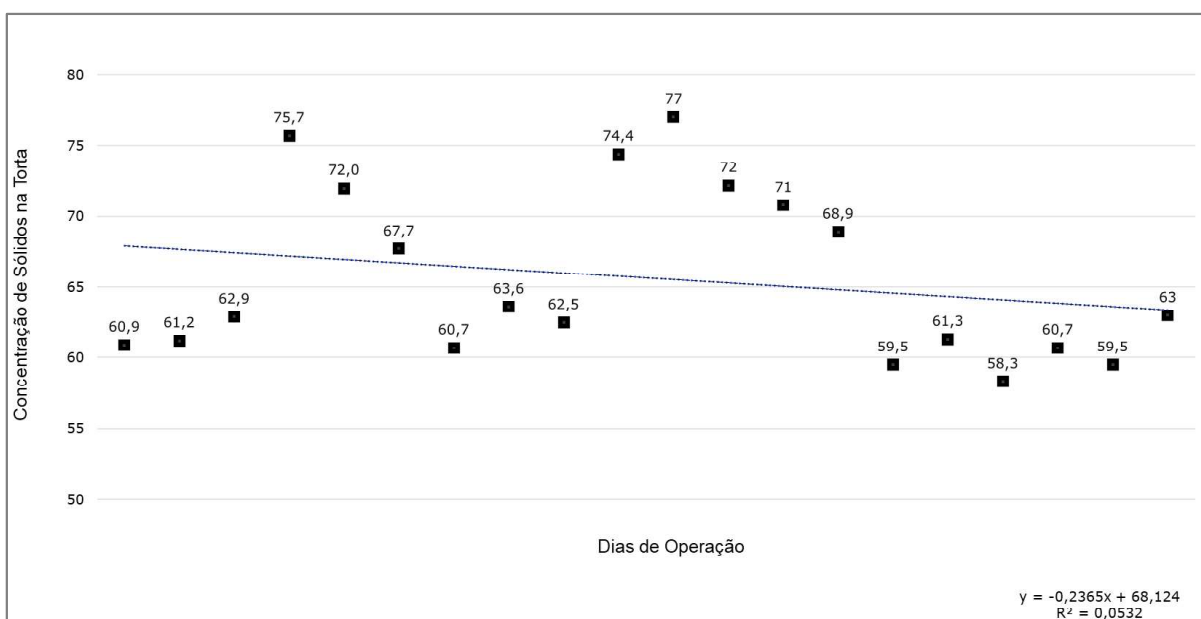
Figura 30. Concentração sólidos na alimentação da centrífuga – Equipamento 2



Fonte: Autoria própria, 2023

Os valores de concentração de sólidos na torta (Figura 31) também não apresentaram uma linha de tendência clara, variando entre os dias de ensaio com valores entre 58,3% e 77%. O desvio padrão desses valores ficou em 5,91 e a variância em 36,82, refletindo essa variação.

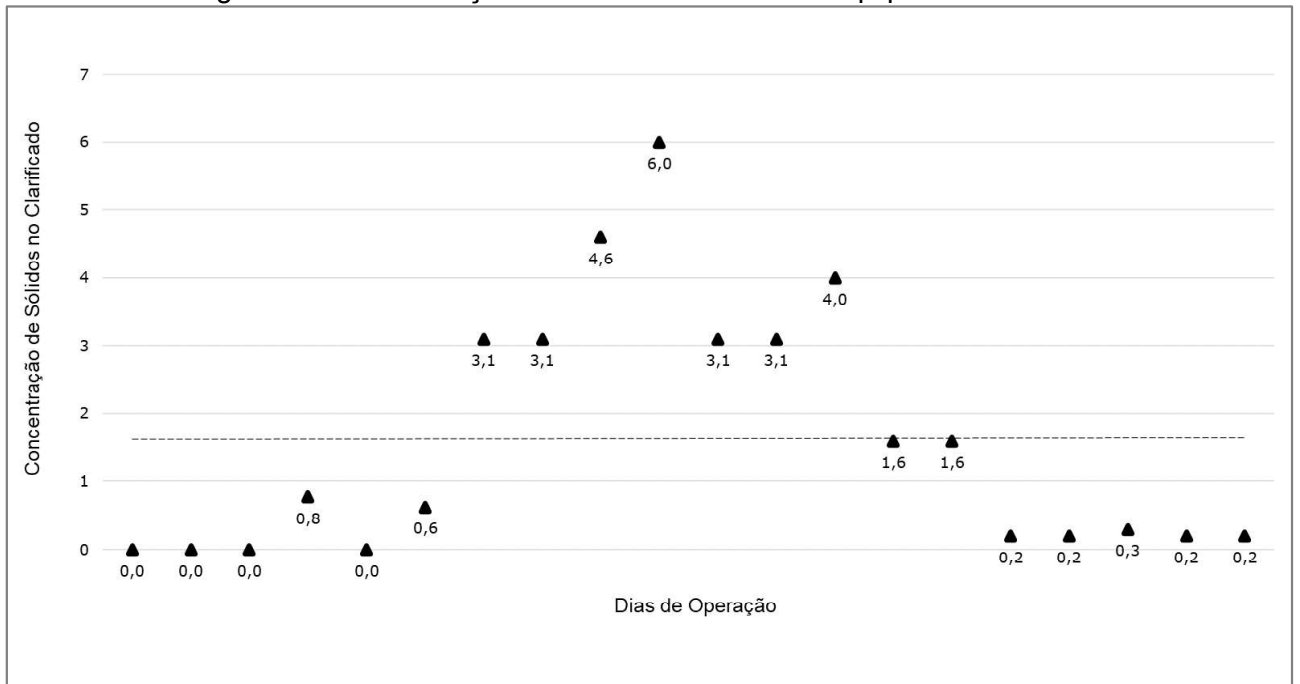
Figura 31. Concentração sólidos na torta – Equipamento 2



Fonte: Autoria própria, 2023

Assim como para os outros fluxos, a concentração de sólidos no clarificado (Figura 32) teve uma grande variação, chegando a valores como 6% de sólidos. Estes números impactam diretamente a recuperação de sólidos do equipamento.

Figura 32. Concentração sólidos no clarificado – Equipamento 2

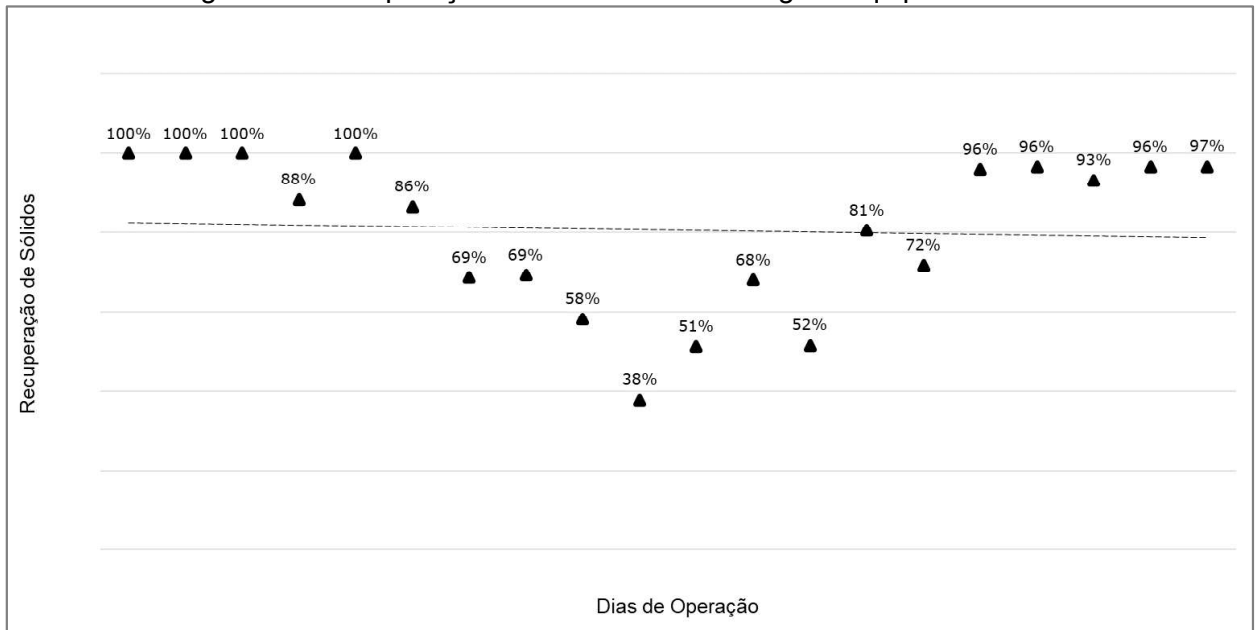


Fonte: Autoria própria, 2023

Quando comparados ao Equipamento 1, o Equipamento 2 possui valores de concentração de sólidos com maior variação, mas com resultados ainda aplicáveis para posterior manuseio do material desaguado. Para os números de concentração de sólidos no clarificado é aplicável a utilização de algum floculante, que permitiria sua redução.

Para a recuperação de sólidos da fase centrifugada, tem-se os valores abaixo (Figura 33). Devido a variações consideráveis dentre os valores amostrados, alguns resultados de recuperação ficaram abaixo do esperado.

Figura 33. Recuperação de sólidos na centrífuga – Equipamento 2



Fonte: Autoria própria, 2023

A pilha de sólidos formada após os ensaios com o Equipamento 2 apresenta a aparência da Figura 34.

Figura 34. Fração de sólidos desaguada após ensaios com Equipamento 2



Fonte: Autor, 2021

5.3.3 ENSAIOS PILOTO COM O EQUIPAMENTO 3

O equipamento testado foi uma centrífuga decanter com diâmetro de cilindro de 353 mm e 1445 mm de comprimento (L/D de 1:3).

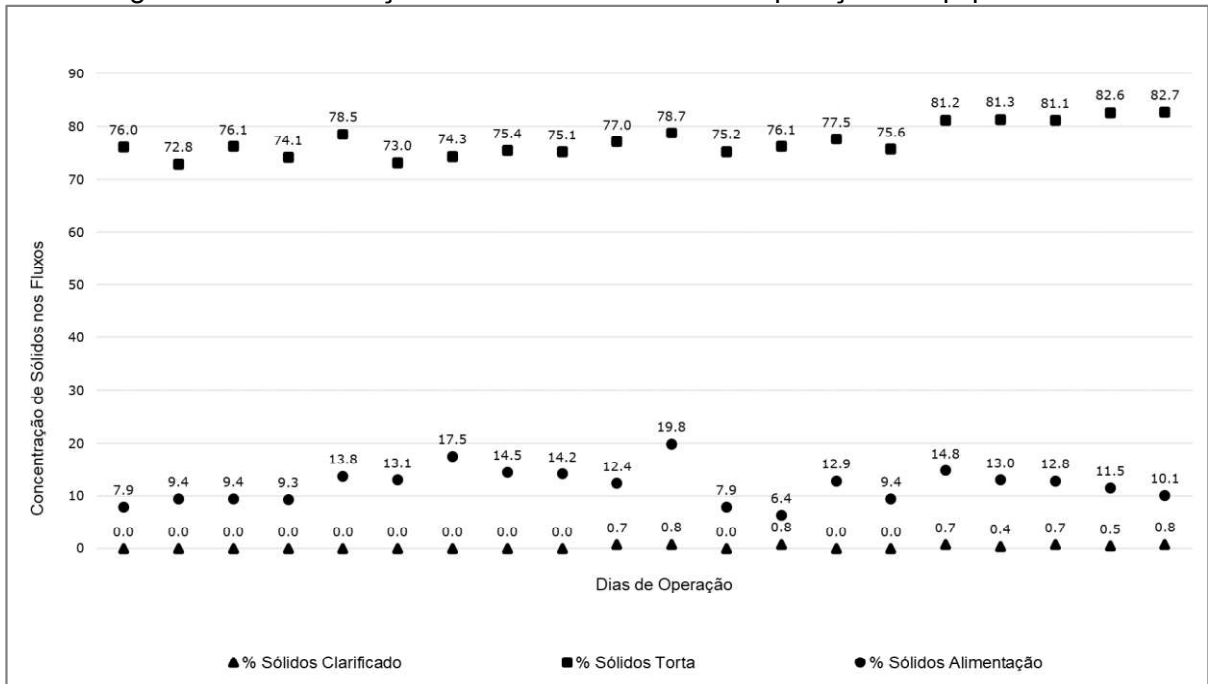
Na Tabela 6 pode-se verificar os valores de concentração de sólidos para os fluxos de alimentação, torta e clarificado, após os dias de ensaio. Os valores médios para a concentração de sólidos nos fluxos de alimentação, torta e clarificado são, respectivamente, 12,01%, 77,2% e 0,27%.

Tabela 6. Valores de concentração de sólidos para o Equipamento 3

Amostra	Alimentação (%)	Torta (%)	Clarificado (%)
1	7,9	76	0
2	9,4	72,8	0
3	9,4	76,1	0
4	9,3	74,1	0
5	13,8	78,5	0
6	13,1	73	0
7	17,5	74,3	0
8	14,5	75,4	0
9	14,2	75,1	0
10	12,4	77	0
11	19,8	78,7	0,7
12	7,9	75,2	0,8
13	6,4	76,1	0
14	12,9	77,5	0,8
15	9,4	75,6	0
16	14,8	81,2	0
17	13	81,3	0,7
18	12,8	81,1	0,4
19	11,5	82,6	0,5
20	10,1	82,7	0,8
Média	12,01	77,2	0,27
Desvio	3,27	3,04	0,34
Variância	11,22	9,73	0,12

Os valores de concentração de sólidos em todos os fluxos amostrados no Equipamento 3 podem ser observados na Figura 35. Pode-se perceber valores mais constantes para cada um dos fluxos, que são avaliados separadamente na sequência.

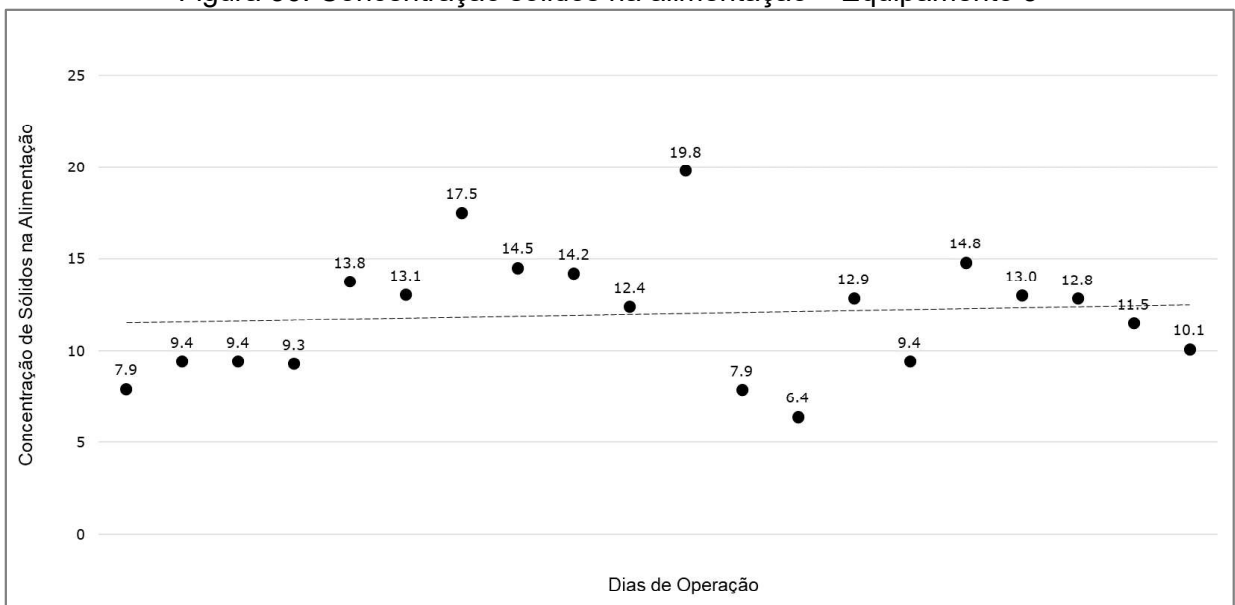
Figura 35. Concentração de sólidos nos fluxos de operação – Equipamento 3



Fonte: Autoria própria, 2023

A concentração de sólidos na alimentação apresentou uma linha de tendência, com valores bem próximos da média, conforme observado na Figura 36. Seu desvio ficou em 3,27, com variância de 11,22.

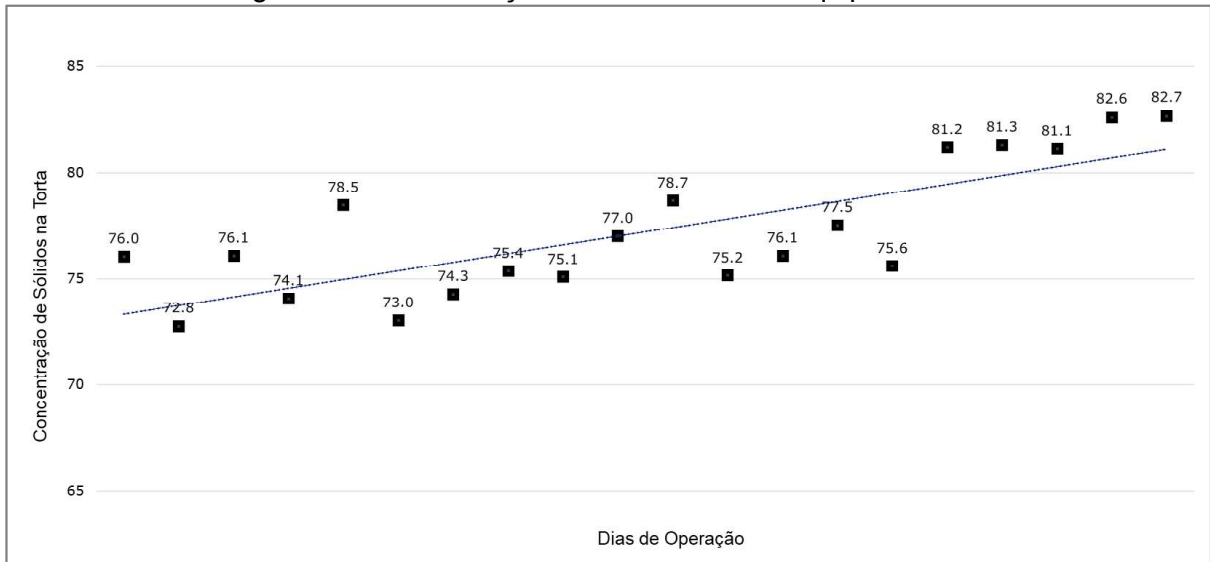
Figura 36. Concentração sólidos na alimentação – Equipamento 3



Fonte: Autoria própria, 2023

Para a concentração de sólidos na torta foi observada uma tendência de aumento, com o maior valor (82,7%) no último dia de teste, conforme Figura 37. Dado que se busca ganhar maturidade no decorrer dos testes, os números estão dentro do esperado.

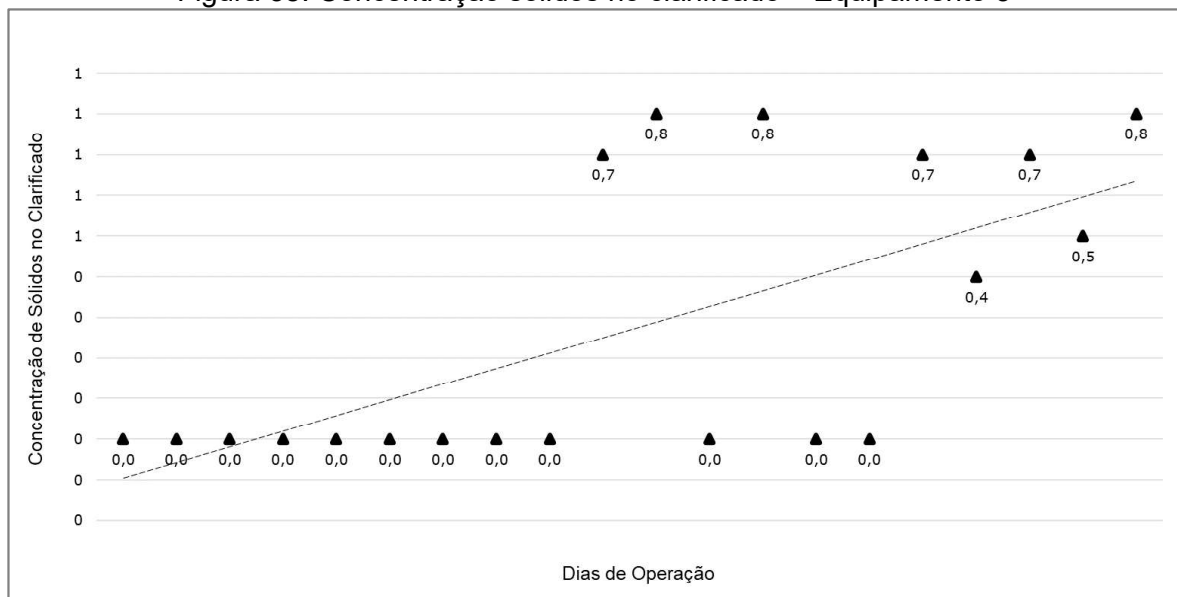
Figura 37. Concentração sólidos na torta – Equipamento 3



Fonte: Autoria própria, 2023

Avaliando a concentração de sólidos na fase líquida, clarificado, segue-se o mesmo padrão (Figura 38), com maiores valores ao final dos testes.

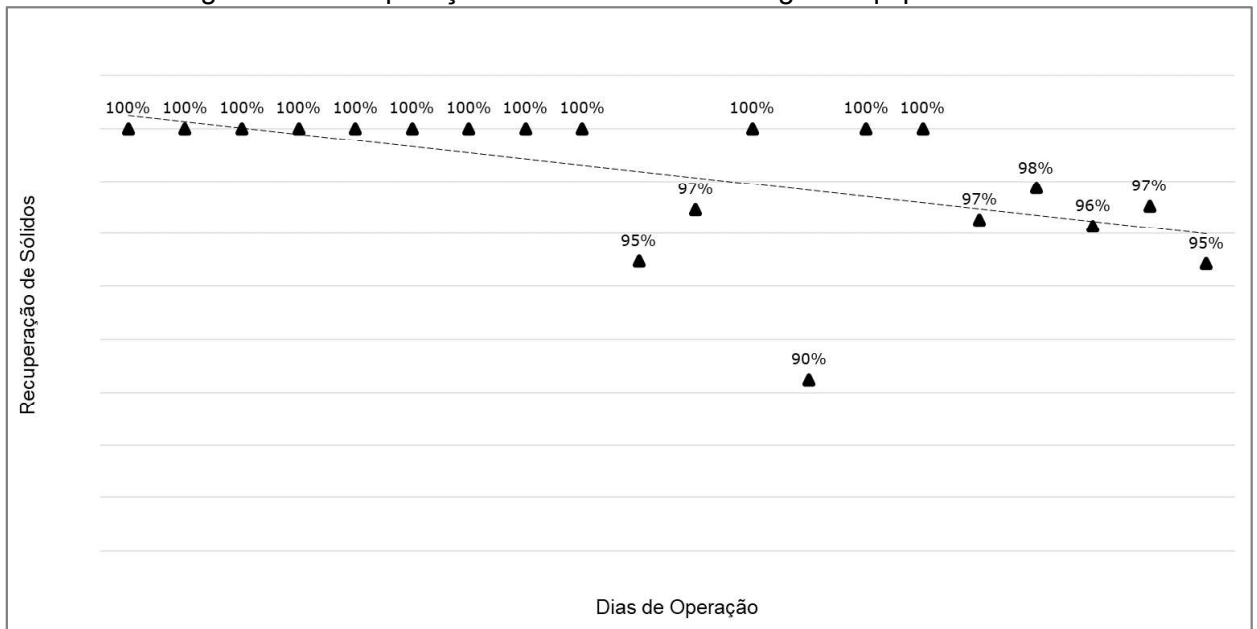
Figura 38. Concentração sólidos no clarificado – Equipamento 3



Fonte: Autoria própria, 2023

Em termos de recuperação de sólidos na fração centrifugada tivemos excelentes resultados, conforme gráfico da Figura 39.

Figura 39. Recuperação de sólidos na centrífuga – Equipamento 3



Fonte: Autoria própria, 2023

Após a conclusão dos ensaios, a pilha de rejeito desaguado pelo Equipamento 3 pode ser observada na Figura 40.

Figura 40. Fração de sólidos desaguada após ensaios com o Equipamento 3



Fonte: Autor, 2022

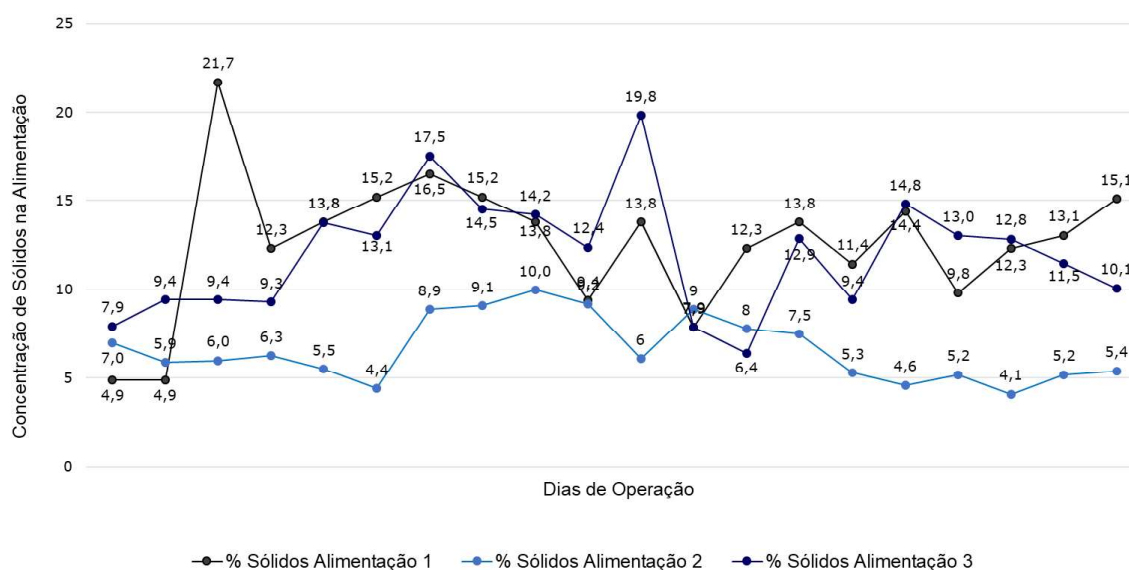
5.3.4 COMPARAÇÃO DE RESULTADOS – EQUIPAMENTOS 1, 2 E 3

Os resultados experimentais permitiram obter uma relação entre os parâmetros do centrífuga e o rendimento da máquina, comparando as três centrífugas decanter quando alimentadas com o mesmo material do mesmo processo. O aumento na concentração de sólidos da alimentação afetou regularmente os resultados, e impactou a recuperação de sólidos.

Em condições ideais, uma maior velocidade de rotação do cilindro produz maior força centrífuga e garante melhor separação dos sólidos e bons resultados no desaguamento na fase sólida. A consequência é menor umidade da torta e/ou menor teor de sólidos no clarificado (BAI et. al., 2022).

Porém, a etapa de processamento da bauxita em uma planta piloto é suscetível a variações, o que resulta em uma variação do teor de sólidos na alimentação, o que influencia os resultados. Avaliando a concentração de sólidos na alimentação durante os três testes, foram percebidas variações no valor ao longo do tempo (Figura 41). O conteúdo sólido da alimentação variou de 4,1% a 21,7%. Essa variação era esperada e positiva para a análise utilizada.

Figura 41. Concentração de sólidos na alimentação – Equipamentos 1, 2 e 3

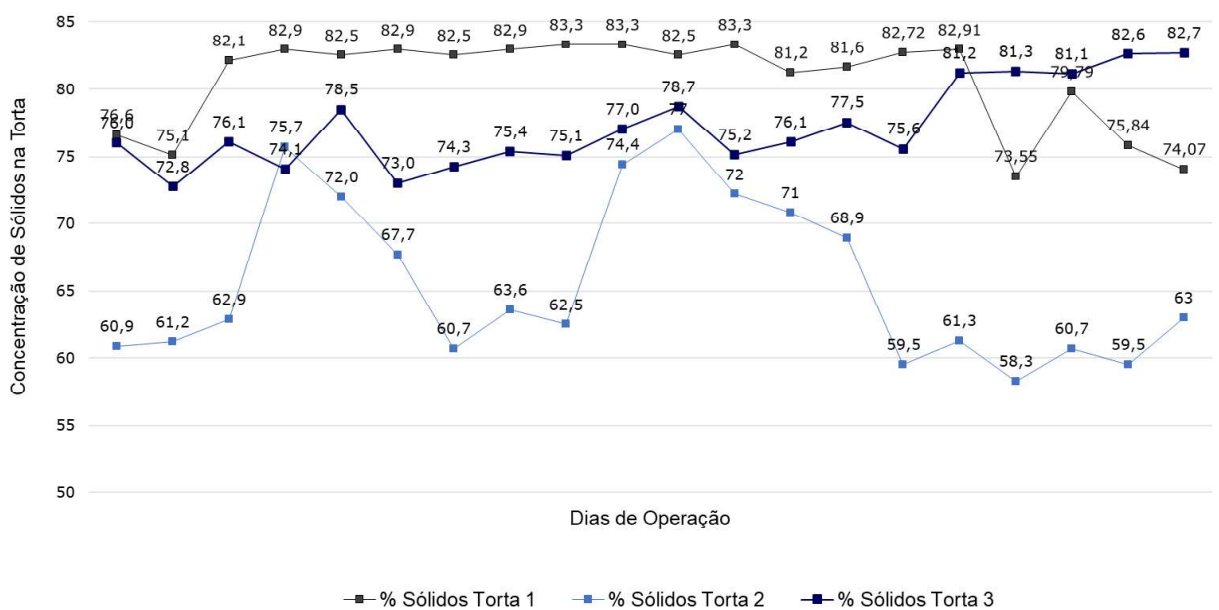


Fonte: Autoria própria, 2023

Além disso, cada equipamento tinha uma capacidade diferente e a concentração de sólidos na alimentação precisava ser ajustada para acomodar interrupções no processo.

O objetivo da fase sólida, a torta, é atingir uma concentração de sólidos tal que permita seu manuseio. O manuseio e a disposição desse material é fortemente influenciado pela adição de polímeros e da técnica de desaguamento utilizada (DOI et. al., 2023). Comparando os resultados dos ensaios nos três equipamentos (Figura 42), e ainda considerando que as características de design e parâmetros operacionais podem influenciar esses resultados, atingimos números muito altos de concentração de sólidos, o que permite que esse material seja manuseado e até transportado via transportador de correia em uma operação a nível industrial, e ajudam a comprovar tecnicamente a aplicação da centrífuga decanter para o desaguamento do rejeito de bauxita. Para maiores detalhes sobre o manuseio adequado e disposição segura dos rejeitos desaguados recomenda-se uma investigação mais aprofundada sobre as suas propriedades reológicas.

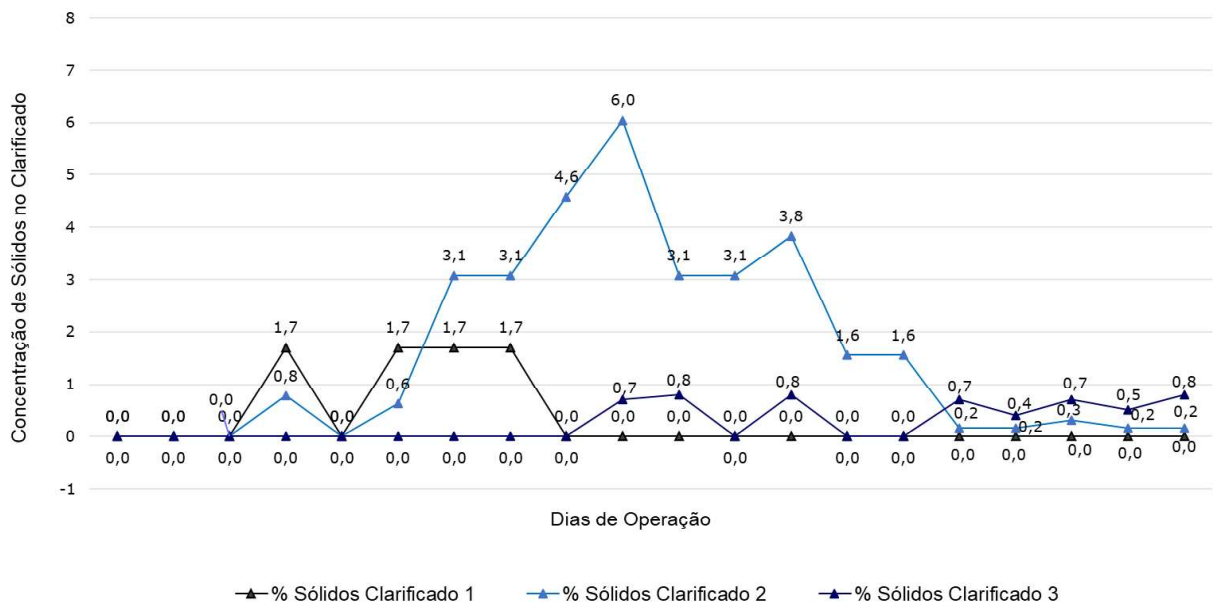
Figura 42. Concentração de sólidos na torta – Equipamentos 1, 2 e 3



Fonte: Autoria própria, 2023

A fase clarificada apresentou uma concentração de sólidos baixa em todos os ensaios, conforme apresentado na Figura 43. Mesmo nos ensaios com o Equipamento 2, onde tivemos um pico no valor de 6%, o número ainda é passível de ser melhorado considerando que os ensaios foram realizados sem a adição de nenhum tipo de floculante, e este diminui os valores de concentração de sólidos para essa fase. Portanto, os resultados permitem afirmar que, em uma operação industrial, a fase líquida apresenta teor de sólidos baixo o suficiente para ser reaproveitada em outras etapas do processo, e garantindo a maior sustentabilidade da atividade mineral.

Figura 43. Concentração de sólidos no clarificado – Equipamentos 1, 2 e 3



Fonte: Autoria própria, 2023

Por fim, a transferência da escala piloto para a escala industrial normalmente só é possível para máquinas geometricamente semelhantes em combinação com décadas de experiência dos fabricantes. Como os modelos existentes normalmente não cobrem todas as variáveis, muitas vezes há desvios entre as previsões e o comportamento real do processo. Dessa forma, quando possível, é de suma importância ensaios em condições reais (GLEISS, NIRSCHL, 2023).

6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Este trabalho contribuiu para diminuir a escassez de referências sobre o desaguamento de rejeitos de bauxita utilizando uma centrífuga decanter, e também mostrou que a alta concentração de sólidos da fase sólida (torta) pode ser alcançada com centrífugas decanter de diferentes marcas, com diferentes parâmetros operacionais e considerando diferentes equipamentos.

Os resultados do “*spin test*” indicaram que o polímero tem influência nos resultados da fase líquida (clarificado), e que pode ser utilizado caso se busquem resultados com menor concentração de sólidos e menor turbidez nesta fase. Para os ensaios piloto não foi utilizado nenhum tipo de floculante e ainda foram alcançados resultados com praticamente nenhum indicativo de sólidos nesta fase.

Tais resultados permitem a avaliação de uma nova estratégia de disposição de rejeitos por meio da qual muitos problemas técnicos, econômicos e ambientais associados à tecnologia de disposição atual podem ser minimizados. A aplicabilidade do equipamento para o desaguamento do rejeito da bauxita da Zona da Mata mineira permite novos estudos de disposição de rejeitos desaguados e até a utilização do rejeito como matéria prima para a produção de coprodutos.

As informações obtidas nos ensaios piloto indicam que a tecnologia de desaguamento por meio de centrífugas decanter tem um futuro promissor no desaguamento de rejeitos de bauxita com características similares ao material estudado. Esta tecnologia apresenta vantagens econômicas e operacionais em relação a outros equipamentos, principalmente em questão de custo e infraestrutura.

No geral, este trabalho contribui para uma melhor compreensão dos fundamentos do desaguamento de rejeitos de bauxita, beneficiando potencialmente o desenvolvimento de novas tecnologias e minimizando os impactos ambientais.

Embora prontos para disposição, os rejeitos obtidos após a etapa de desaguamento ainda são de difícil manuseio e exigem um gerenciamento considerável. Portanto, o manuseio adequado e a disposição segura dos rejeitos desaguados de bauxita podem

ser esclarecidos em estudos posteriores, com foco em considerações técnicas e operacionais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAL – Associação Brasileira de Alumínio. Alumínio brasileiro: Soluções para uma vida sustentável. São Paulo, 2017.

ALVES, P., I., A. **Empilhamento De Rejeito Filtrado: A Expansão De Uma Alternativa Para Substituição De Barragens**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, 2020.

ANDRITZ Filtro Prensa. São Paulo, 2022. Disponível em: <<https://www.andritz.com/separation-en/filter-presses-for-mining-pt>>.

ANM - Agência Nacional de Mineração. **Sumário Mineral 2017. Alumínio**. Brasília, p 54-56. 2019.

BAI, C., PARK H., WANG, L. **Modelling solid-liquid separation and particle size classification in decanter centrifuges**. School of Chemical Engineering, The University of Queensland. Australia, 2022.

BANERJEE, P. K.; MANKAR, A. U.; KUMAR, V. **Mineral Processing Beneficiation Operations and Process Optimization Through Modeling**. Chapter 4 - Beneficiation of bauxite ores. p 117-166, 2023.

BHUKTE, P., PUTTEWAR, S. P., DAWARE, G., AGNIHOTRI, A., THAKRE, G. P. **Status of Lateritic Bauxite deposits of India for non-metallurgical applications**. Indian Geological Congress. India. v. 9, n. 2, p. 71-79, 2017.

CARVALHO, A. 1989. **As Bauxitas no Brasil: Síntese de um programa de pesquisa**. Universidade de São Paulo - Instituto de Geociências. São Paulo, 1989.

CARVALHO, W., D., S. **Sistema de disposição compartilhada de estéreis e rejeitos desaguados da mina de Fernandinho**. Dissertação de Mestrado. Programa de pós-graduação em geotecnia da UFOP, p. 161. 2017

CHAVES, A. P. **Desaguamento, Espessamento e Filtragem**. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. São Paulo, v. 2, 4 ed. 2013.

CHAVES, A. P. **Manuseio de Sólidos Granulados**. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. São Paulo, v. 5, 1 ed. 2011.

DOI, A.; NGUYEN, T.A.; NGUYEN, N.N.; NGUYEN, C.V.; RAJI, F.; NGUYEN, A.V. **Enhancing shear strength and handleability of dewatered clay-rich coal tailings for dry-stacking**. Journal of Environment Management. Vol. 34. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.118488>

FELIPE, R. A. S. **Modelagem e simulação do circuito de britagem de córrego do Sítio I com desenvolvimento de modelo para moinho de martelos**. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 129, 2019.

FRANÇA, S. C. A.; MASSARANI, G. **Separação sólido-líquido**. In: Tratamento de minérios. 6.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC. Cap.14, p.597-647. 2018.

GLEISS, M.; NIRSCHL, H. **About Modeling and Optimization of Solid Bowl Centrifuges**. Institute of Mechanical Process Engineering and Mechanics, Karlsruhe Institute of Technology. Germany. 2023.

GUIMARÃES, N. C. **Filtragem de Rejeitos de Minério de Ferro visando sua disposição em Pilhas**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. p 129, 2011.

HANSEN, A. M.; LARSEN, S. V.; STEENHOLDT, N. C.; AAEN, S. B.; GRAGAARD, N. D.; KOLLIAS, K. **Social impacts of bauxite mining and refining: A review**. The Extractive Industries and Society, v. 14, 2023.

Instituto Minere. São Paulo, 2022. Disponível em: <<https://institutominere.com.br/blog/empilhamento-de-rejeito-a-seco-alternativa-a-disposicao-em-barragens>>.

JACKSON, J. F. **Solid bowl decanter centrifuges of the scroll discharge type**. US Patent 4240578A, 1980.

KLUG, R.; SCHWARZ, N. **Dewatering Tailings: rapid water recovery by use of centrifuges**. 22nd International conference on paste, thickened and filtered tailings, Australian Centre for Geomechanics. Perth, Australia. 2019.

LEUNG, W. W. **Flocculation with Decanter Centrifuges**. Centrifugal Separations in Biotechnology. Butterworth-Heinemann, 2 ed, p. 331-352. 2020.

LOZANO, F. A. E. **Seleção de locais para barragens de rejeito usando o método de análise hierárquica**. Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 142, 2006.

LUZ, A.B.; SAMPAIO, J.A.; FRANÇA, S.C.A. **Tratamento de Minérios**. CETEM/MCT. 5 ed. Rio de Janeiro, p. 161-180, 2010.

MENESKLOU, P.; SINN, T.; NIRSCHL, H.; GLEISS, M. **Scale-Up of Decanter Centrifuges for the Particle Separation and Mechanical Dewatering in the Minerals Processing Industry by Means of a Numerical Process Model**. Minerals, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/min11020229>

NGUYEN, Q. D., BOGER, D.V. **Application of rheology to solving tailings disposal problems**. International Journal of Mineral Processing. v. 54. p. 217–233, 1998.

OLIVEIRA, M. L. M; LUZ, J. A. M.; LACERDA, C. M. **Espessamento e Filtragem**. Apostila. Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2004.

PINTO, T. C. S. **Aplicação de técnicas clássicas para polpas não floculadas de dimensionamento de espessadores aplicadas a suspensão de salmoura e lodo biológico**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, p. 107, 2007.

RECORDS, A.; SUTHERLAND, K. **Decanter centrifuge handbook**. Elsevier Advanced Technology. 1 ed, 2001.

Relatório Interno CBA - **Relatório peer review: Estudo de uso da centrífuga para desague**, 2019.

SAMPAIO, J.A.; ANDRADE M. C.; DUTRA A. J. B. **Bauxita**. Rochas e minerais industriais. Rio de Janeiro, 2. ed, p. 311-377, 2008.

SAMPAIO, J. A.; SILVA, F. A. N. G. **Determinação das densidades de sólidos e de polpa**. Tratamento de Minérios: práticas laboratoriais. Rio de Janeiro, p. 37-51, 2007.

SANTOS, W. M. **Mineralogia e geoquímica da bauxita derivada do anortosito, Barro Alto, Goiás**. Dissertação de Mestrado. Área de concentração: Prospecção e Geologia Econômica. Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, Brasília, Brasil, p. 186, 2011.

SCHWARZ N. **Selecting the right centrifuge – The Jargon Demystified**, Australia, 2011

SCHUBERT, T.; ERGIN, I.; PANETTA, F.; HINRICHS, J.; ATAMER, Z. **Application of a temperature controlled decanter centrifuge for the fractionation of α S-, β - and κ -casein on pilot scale**. International Dairy Journal, v. 122, 2021.

SCHULTE, R.F., and FOLEY, N.K., 2014, **Compilation of gallium resource data for bauxite deposits**: U.S. Geological Survey Open-File Report. p. 14, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.3133/ofr20131272>

SILVERBLATT, C.E. e EASTON, J.H. **Solid-liquid separation: characterization of process objectives and general approach to equipment selection**. Mineral Processing Plant Design, Practice and Control. SME Inc., v. 2, p. 1255-1261, 2002.

TESSAROTO, C. **Empilhamento a seco para rejeitos de processos minerais (Dry Stacking)**. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 26., 2015, Unifal. Poços de Caldas, p. 8. 2015.

U.S. Geological Survey. Mineral commodity summaries 2017: U.S. Geological Survey, p. 202. 2017

VALADÃO, G.E.S. **Separação Sólido-líquido**. EEUFMG. Belo Horizonte. p. 80, 2008.

VAN DEURSEN, C. M. **Métodos de Desaguamento e Disposição de Rejeito da Bauxita: Estudo de Caso e Avaliação Econômica**. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, p. 129, 2016.

WILLS, B.A., FINCH, J. **Will's Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery**. 8 ed. Butterworth-Heinemann, 2016.

APÊNDICE I – VALORES UTILIZADOS PARA O CÁLCULO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS

Dp	%sólidos	Dp	%sólidos	Dp	%sólidos	Dp	%sólidos	Dp	%sólidos
1,00	0,0%	1,41	48,5%	1,82	75,1%	2,23	91,9%	2,64	103,5%
1,01	1,7%	1,42	49,3%	1,83	75,6%	2,24	92,3%	2,65	103,8%
1,02	3,3%	1,43	50,1%	1,84	76,1%	2,25	92,6%	2,66	104,0%
1,03	4,9%	1,44	50,9%	1,85	76,6%	2,26	92,9%	2,67	104,2%
1,04	6,4%	1,45	51,7%	1,86	77,1%	2,27	93,2%	2,68	104,5%
1,05	7,9%	1,46	52,5%	1,87	77,5%	2,28	93,6%	2,69	104,7%
1,06	9,4%	1,47	53,3%	1,88	78,0%	2,29	93,9%	2,70	104,9%
1,07	10,9%	1,48	54,1%	1,89	78,5%	2,30	94,2%	2,71	105,2%
1,08	12,3%	1,49	54,8%	1,90	78,9%	2,31	94,5%	2,72	105,4%
1,09	13,8%	1,50	55,6%	1,91	79,4%	2,32	94,8%	2,73	105,6%
1,10	15,2%	1,51	56,3%	1,92	79,9%	2,33	95,1%	2,74	105,8%
1,11	16,5%	1,52	57,0%	1,93	80,3%	2,34	95,4%	2,75	106,1%
1,12	17,9%	1,53	57,7%	1,94	80,8%	2,35	95,7%	2,76	106,3%
1,13	19,2%	1,54	58,4%	1,95	81,2%	2,36	96,0%	2,77	106,5%
1,14	20,5%	1,55	59,1%	1,96	81,6%	2,37	96,3%	2,78	106,7%
1,15	21,7%	1,56	59,8%	1,97	82,1%	2,38	96,6%	2,79	106,9%
1,16	23,0%	1,57	60,5%	1,98	82,5%	2,39	96,9%	2,80	107,1%
1,17	24,2%	1,58	61,2%	1,99	82,9%	2,40	97,2%	2,81	107,4%
1,18	25,4%	1,59	61,8%	2,00	83,3%	2,41	97,5%	2,82	107,6%
1,19	26,6%	1,60	62,5%	2,01	83,7%	2,42	97,8%	2,83	107,8%
1,20	27,8%	1,61	63,1%	2,02	84,2%	2,43	98,1%	2,84	108,0%
1,21	28,9%	1,62	63,8%	2,03	84,6%	2,44	98,4%	2,85	108,2%
1,22	30,1%	1,63	64,4%	2,04	85,0%	2,45	98,6%	2,86	108,4%
1,23	31,2%	1,64	65,0%	2,05	85,4%	2,46	98,9%	2,87	108,6%
1,24	32,3%	1,65	65,7%	2,06	85,8%	2,47	99,2%	2,88	108,8%
1,25	33,3%	1,66	66,3%	2,07	86,2%	2,48	99,5%	2,89	109,0%
1,26	34,4%	1,67	66,9%	2,08	86,5%	2,49	99,7%	2,90	109,2%
1,27	35,4%	1,68	67,5%	2,09	86,9%	2,50	100,0%	2,91	109,4%
1,28	36,5%	1,69	68,0%	2,10	87,3%	2,51	100,3%	2,92	109,6%
1,29	37,5%	1,70	68,6%	2,11	87,7%	2,52	100,5%	2,93	109,8%
1,30	38,5%	1,71	69,2%	2,12	88,1%	2,53	100,8%	2,94	110,0%
1,31	39,4%	1,72	69,8%	2,13	88,4%	2,54	101,0%	2,95	110,2%
1,32	40,4%	1,73	70,3%	2,14	88,8%	2,55	101,3%	2,96	110,4%
1,33	41,4%	1,74	70,9%	2,15	89,1%	2,56	101,6%	2,97	110,5%
1,34	42,3%	1,75	71,4%	2,16	89,5%	2,57	101,8%	2,98	110,7%
1,35	43,2%	1,76	72,0%	2,17	89,9%	2,58	102,1%	2,99	110,9%
1,36	44,1%	1,77	72,5%	2,18	90,2%	2,59	102,3%	3,00	111,1%
1,37	45,0%	1,78	73,0%	2,19	90,6%	2,60	102,6%	3,01	111,3%
1,38	45,9%	1,79	73,6%	2,20	90,9%	2,61	102,8%	3,02	111,5%
1,39	46,8%	1,80	74,1%	2,21	91,3%	2,62	103,1%	3,03	111,7%
1,40	47,6%	1,81	74,6%	2,22	91,6%	2,63	103,3%	3,04	100,0%